

**Untersuchungen zu Klauengesundheit,
Knorpelvolumina und Körperzusammensetzung
beim Mastschwein in verschiedenen Haltungssystemen
unter Verwendung von Magnetresonanz-Tomographie
und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie**

von Theresa Dölle

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

**Untersuchungen zu Klauengesundheit
Knorpelvolumina und Körperzusammensetzung
beim Mastschwein in verschiedenen Haltungssystemen
unter Verwendung von Magnetresonanztomographie
und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie**

von Theresa Dölle
aus Erfurt

München 2019

Aus dem Lehr- und Versuchsgut der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Arbeit angefertigt unter der Leitung von: Prof. Dr. Armin M. Scholz

Mitbetreuung durch: Prof. Dr. Maren Bernau

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatter: Prof. Dr. Armin M. Scholz

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg

Tag der Promotion: 25. Februar 2019

In Liebe und Dankbarkeit meinen Eltern gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG.....</u>	<u>1</u>
2	<u>KENNTNISSTAND.....</u>	<u>3</u>
2.1	AUFBAU DER KLAUEN UND GELENKE	3
2.1.1	KLAUENSCHUH	3
2.1.1.1	Aufbau der Schweineklauen.....	3
2.1.1.2	Besonderheiten der Klauen beim Schwein.....	4
2.1.1.3	Funktionen des <i>Stratum corneum</i> (Horn)	6
2.1.2	AUFBAU VON GELENKEN	6
2.1.3	KLAUENGELLENK (ARTICULATIONES INTERPHALANGAE DISTALES)	7
2.1.4	ELLBOGENGELLENK (ARTICULATIO CUBITI)	7
2.1.5	SCHULTERGELENK (ARTICULATIO HUMERI)	8
2.1.6	KNIEGELENK (ARTICULATIO GENUS)	8
2.1.6.1	Kniekehlgelenk (Articulatio femorotibialis).....	8
2.1.6.2	Kniescheibengelenk (Articulatio femoropatellaris).....	8
2.1.6.3	Gelenkknorpel	9
2.2	WICHTIGE ERKRANKUNGEN DES BEWEGUNGSAPPARATES	10
2.2.1	OSTEOCHONDROSE (ARTHROPATHIA DEFORMANS, OSTEOCHONDROSIS)	10
2.2.2	BURSITIS (BURSAE AUXILIARES).....	12
2.2.3	PANARITIUM	13
2.2.4	DURCH TECHNOPATHIEN BEDINGTE KLAUENLÄSIONEN	14
2.2.4.1	Entzündung	16
2.2.4.2	Trauma	16
2.2.4.3	Ballenveränderungen bzw. Sohlendefekte	19
2.2.4.4	Überlange Klauen/ Stallklauen	20
2.2.4.5	Überlange Afterklauen.....	22
2.2.4.6	Hornspalten/ Hornrisse.....	22

2.2.4.7	Hornklüfte	24
2.3	EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE KLAUEN- UND GELENKSGESUNDHEIT BEIM	
	SCHWEIN	25
2.3.1	HALTUNG	25
2.3.2	GENETIK	29
2.3.2.1	Deutsche Landrasse als Beispiel einer Mutterrasse	29
2.3.2.2	Piértrain als Beispiel einer Vatterrasse	30
2.3.2.3	Masthybriden	31
2.3.2.4	Genetischer Einfluss auf die Klauen- und Gelenkgesundheit	31
2.3.3	FÜTTERUNG	34
2.3.4	GESCHLECHT	36
2.3.5	GRUPPENGEFÜGE.....	37
2.3.6	„TIERWOHL“ UND VERHALTEN	38
2.3.7	KLAUENPFLEGE	41
2.4	MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (MRT)	42
2.4.1	TECHNISCHES PRINZIP	42
2.4.2	VORTEILE DER UNTERSUCHUNG MITTELS MRT	47
2.4.3	NACHTEILE DER UNTERSUCHUNG MITTELS MRT	47
2.4.4	EINSATZ DER MRT IN DER HUMANMEDIZIN	48
2.4.5	EINSATZ DER MRT ZUR UNTERSUCHUNG VON KNORPELGEWEBE BEIM MENSCHEN	49
2.4.6	EINSATZ DER MRT ZUR UNTERSUCHUNG VON KNORPELGEWEBE IN DER TIERMEDIZIN.....	50
2.5	DUALENERGIE-RÖNTGENABSORPTIOMETRIE (DXA).....	53
2.5.1	TECHNISCHES PRINZIP	53
2.5.2	VORTEILE DER UNTERSUCHUNG MITTELS DXA	56
2.5.3	NACHTEILE DER UNTERSUCHUNG MITTELS DXA	57
2.5.4	EINSATZGEBIETE IN DER HUMANMEDIZIN	58
2.5.5	EINSATZGEBIETE IN DER TIERMEDIZIN	59

2.6	SCORINGSYSTEME IM RAHMEN DER LAHMHEITSDIAGOSTIK BEIM SCHWEIN	63
2.6.1	PRINZIP VON SCORINGSYSTEMEN	63
2.6.2	VOR- UND NACHTEILE VON SCORINGSYSTEMEN	64
2.6.3	KLAUEN- UND GELENKSCORINGSYSTEME BEIM SCHWEIN	64
2.6.4	LAHMHEITSSCORING BEIM SCHWEIN	68
3	<u>VERSUCHSTIERE UND METHODEN</u>	78
3.1	VERSUCHSTIERE	78
3.2	METHODEN	82
3.2.1	VERSUCHSAUFBAU	82
3.2.2	VORBEREITUNG DER TIERE FÜR DIE UNTERSUCHUNGEN	83
3.2.3	UNTERSUCHUNG MITTELS MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE	83
3.2.3.1	Lagerung der Versuchstiere	84
3.2.3.2	Verwendete Messprotokolle und gewählte Untersuchungsregionen	85
3.2.4	UNTERSUCHUNG MITTELS DUALENERGIE-RÖNTGENABSORPTIOMETRIE	85
3.2.4.1	Lagerung der Versuchstiere	86
3.2.4.2	Verwendetes Messprotokoll	87
3.2.5	UNTERSUCHUNG DER KLAUENWINKEL	87
3.2.6	EINSATZ VON SCORINGSYSTEMEN	89
3.2.6.1	Bursa-Scoring	89
3.2.6.2	Klauenbonitur-Scoring	89
3.2.6.3	Lahmheitsscoring	91
3.3	AUSWERTUNG	92
3.3.1	AUSWERTUNG DER MR-BILDER	92
3.3.1.2	Schulter-, Ellbogensequenz	93
3.3.1.3	Kniesequenz	96
3.3.2	AUSWERTUNG DER DXA-DATEN	98
3.3.3	AUSWERTUNG DER KLAUENWINKELMESSUNG	100
3.3.4	AUSWERTUNG DER SCORING-DATEN	100

3.3.5	STATISTISCHE ANALYSE DER ERGEBNISSE (STATISTISCHE MODELLE).....	100
4	<u>ERGEBNISSE</u>	101
4.1	ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG DER MRT-BILDER	101
4.1.1	SCHULTER- UND ELLBOGENSEQUENZ.....	101
4.1.2	KNIESEQUENZ	104
4.2	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG MITTELS DUALENERGIE- RÖNTGENABSORPTIOMETRIE	110
4.3	BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DXA- UND MRT-ERGEBNISSEN	113
4.4	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG DER KLAUENWINKEL	115
4.5	ERGEBNISSE DER SCORINGS	119
4.5.1	LAHMHEITS-SCORING.....	119
4.5.2	BURSA-SCORING	119
4.5.3	KLAUENBONITUR-SCORING.....	119
5	<u>DISKUSSION</u>	123
5.1	DISKUSSION VERSUCHSTIERE UND VERSUCHSAUFBAU	123
5.2	DISKUSSION DER MRT-DATEN	124
5.2.1	SCHULTER-, ELLBOGENSEQUENZ.....	125
5.2.1.1	Einfluss Haltungssystem	125
5.2.1.2	Einfluss Gruppe	126
5.2.1.3	Einfluss Geschlecht	127
5.2.2	KNIESEQUENZ	128
5.2.2.1	Einfluss Haltungssystem	128
5.2.2.2	Einfluss Gruppe	129
5.2.2.3	Einfluss Geschlecht	130
5.2.3	GEMEINSAME BETRACHTUNG DER UNTERSUCHTEN KNORPELREGIONEN	130
5.3	DXA-DATEN	132
5.3.1	EINFLUSS HALTUNGSSYSTEM	132
5.3.2	EINFLUSS GRUPPE	134

5.3.3	EINFLUSS GESCHLECHT	136
5.4	BEZIEHUNG ZWISCHEN KNORPELVOLUMEN UND KNOCHENMINERALDICHTGEHALT.....	138
5.5	KLAUENWINKEL	139
5.5.1	EINFLUSS HALTUNGSSYSTEM	139
5.5.2	EINFLUSS GRUPPE	140
5.5.3	EINFLUSS GESCHLECHT	140
5.6	SCORING.....	141
5.6.1	LAHMHEITSSCORING	141
5.6.2	BURSASCORING.....	143
5.6.3	KLAUENBONITURSCORING	144
5.6.3.1	Unterentwicklung der Innenklauen	144
5.6.3.2	Überlange Klauen.....	144
5.6.3.3	Überlange Afterklauen.....	145
5.6.3.4	Kronsaumverletzungen.....	145
5.6.3.5	Lederhautblutungen/Wandhornabschürfungen	146
5.6.3.6	Hornrisse	146
5.6.3.7	Sohlendefekte.....	147
5.6.3.8	Zusammenhangstrennungen Sohle/ Ballen, Weiße-Linie-Defekte.....	148
6	SCHLUSSFOLGERUNG	150
7	ZUSAMMENFASSUNG	151
8	SUMMARY	154
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	156
10	DANKSAGUNG	172

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
aid	Auswertungs- und Informationsdienst
AKS	Außenklimastall
AV	Afterklauenverletzungen
B	Magnetfeldstärke
B ₀	Stärke des externen Magnetfeldes in Tesla
BCS	Body-Condition-Scores
BHD	Ballenhorndefekte
BHW	Ballenhornwucherungen
BMC	Bone Mineral Content / Knochenmineralgehalt
BMD	Bone Mineral Density / Knochenmineraldichte
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
Ca	Calcium
Ce	Cerium
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
d	Differenz bzw. Änderung (physikalisch)
DL	Deutsche Landrasse
DMK	Durchmesser der Knorpelaufgabe
DXA	Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie
et al.	et alii (und andere)
ELISA	Enzyme-linked Immunosorbent Assay
Fett	Fettgehalt
Fett_PC	prozentualer Fettanteil

FFM	Fettfreie-Masse
FLASH	fast low-angle shot
F1	Filialgeneration 1
g	Gramm
H	hinten (im Zusammenhang)
H	Wasserstoff (im Zusammenhang)
h	Stunde
HF	Hochfrequenz
HR	Hornspalten und -risse
Hz	Hertz
h^2	Heritabilität
I	Strahlenintensität / Photonenintensität
IgG	Immunglobulin G
IgM	Immunglobulin M
KeV	Kiloelektronenvolt
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
KSV	Kronsaumverletzungen
kV	Kilovolt
KV	Knorpelvolumen
KV_Abbau_FK_li	Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links innen
KV_Abbau_FK_la	Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links außen
KV_Abbau_FK_ri	Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts innen
KV_Abbau_FK_ra	Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts außen
KV_FK_la	Knorpelvolumen Femurkondylus links außen
KV_FK-li	Knorpelvolumen Femurkondylus links innen
KV_FK_ra	Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen
KV_FK_ri	Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen

KW	Klauenwinkel
KW_HLa	Klauenwinkel hinten links außen
KW_HLi	Klauenwinkel hinten links innen
KW_HRa	Klauenwinkel hinten rechts außen
KW_HRi	Klauenwinkel hinten rechts innen
KW_VLa	Klauenwinkel vorne links außen
KW_VLi	Klauenwinkel vorne links innen
KW_VRi	Klauenwinkel vorne rechts innen
KW_VRa	Klauenwinkel vorne rechts außen
LHB	Lederhautblutungen
LMP	Lean Meat Percentage / Referenz-Magerfleisch-Prozentsatz
mA	Milliampere
Mager	Magerfleischgehalt
MFBIA	Multifrequency-bioelectrical-impedance-analysis
mg	Milligramm
MHz	Megahertz
min	Minuten
mm	Millimeter
Mn	männlich
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
MZST	Mehrzweckstall
μCT	Mikrocomputertomographie
μGy	Mikrogray
μSv	Mikrosievert
N	Newton
n	Anzahl

O	Sauerstoff
OR	Quotenverhältnis
P	Panaritien
p	probability (Überschreitungswahrscheinlichkeit, Signifikanzwert)pH potentia hydrogenii („Stärke des Wasserstoffs")
Pi	Piétrain
QTL	Quantitative trait locus
R	Dualenergie-Röntgenschwächungskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
REML	restricted maximum likelihood
RMSE (= SEE)	Root Mean Squares Error = Standard Error of Estimation (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
RSD	residuale Standardabweichung
SD	Sohlendefekte
s.e.	standard error
sec	Sekunde
Sm	Samarium
SNPs	Single-nucleotide-polymorphisms
SWI	Susceptibility-Weighted-Imaging
T	Tesla
TE	Echo-Time
TR	Repetitions-Time
tVAS	regelmäßige visuelle analoge Skala
T1	longitudinale Relaxationszeit
T2	transversale Relaxationszeit
u.a.	unter anderem

ÜA	Überlange der Afterklauen
ÜK	Überlange Klauen
UI	Unterentwicklung der Innenklauen
USA	United States of America
V	vorne
vs.	versus
ω_0	Präzessionsfrequenz in Hertz oder Megahertz
Wb	weiblich
WHA	Wandhornabschürfungen
WLD	Weiß-Linie-Defekte
x	Weglänge
γ	gyromagnetisches Verhältnis
z.B.	zum Beispiel
ZSB	Zusammenhangstrennungen zwischen Sohle und Ballen
2D	Zweidimensionalität /zweidimensional
3D	Dreidimensionalität /dreidimensional
%	Prozent

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010)	3
Abbildung 2: Querschnitt der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010).....	4
Abbildung 3: Längsschnitt der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010).....	4
Abbildung 4: Physiologische Fußungsfläche.....	5
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Gelenkes, modifiziert nach König und Liebich (2009)	7
Abbildung 6: Bursitis am linken Sprunggelenk	13
Abbildung 7: Panaritium bei einem Ferkel.....	14
Abbildung 8: Hochgradige Unterentwicklung der Innenklaue.....	16
Abbildung 9: Einblutung im Wandhorn	18
Abbildung 10: Hochgradige Wandhornabschürfung.....	18
Abbildung 11: Hochgradiger Sohlendefekt	20
Abbildung 12: Rollklauenbildung	22
Abbildung 13: Tiefer Wandriss	24
Abbildung 14: Deutsche Landrasse Sau	30
Abbildung 15: Piétrain-Jungeber, Foto: A.M.Scholz.....	31
Abbildung 16: Protonenbewegung im Magnetfeld, aus Bernau (2011), modifiziert nach Schild (1990)	46
Abbildung 17: Darstellung des 3-Komponenten-Modells aus Scholz (2002)	53
Abbildung 18: Physiologisches Gangbild beim Wildschwein, © A.M. Scholz.....	69
Abbildung 19: Darstellung der tVAS-Skala, modifiziert nach Nalon et al. (2014)....	75
Abbildung 20: Außenklimastall mit Tiefstreu und erhöhtem Fressbereich mit Spaltenboden sowie Doppelfitmixfutterstation (ehemals Fa. Mannebeck).....	79
Abbildung 21: Schweine im Liegebereich des Außenklimastalles	79
Abbildung 22: Mehrzweckstall mit Öko-Vollspaltenboden.....	80
Abbildung 23: Breifutterautomaten im Mehrzweckstall	80

Abbildung 24: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues	82
Abbildung 25: Positionierung eines Schweines auf dem Siemens Magnetom Open.....	84
Abbildung 26: Positionierung eines Schweines auf dem DXA-Scanner.....	86
Abbildung 27: Messen der Klauenwinkel	88
Abbildung 28: Positionierung des Winkelmessers an der Klaue	88
Abbildung 29: Bildliche Darstellung des Klauenboniturscorings	90
Abbildung 30: Darstellung des MR-Bildes medial des linken Humeruskopfes. Die blaue Linie im linken Bild kennzeichnet die Schnittebene, die im rechten Bild wiedergegeben ist.....	93
Abbildung 31: Darstellung der untersuchten Knorpelscheiben mit 3D Doctor® (blau=Ellbogenknorpel; orange=Schulterknorpel; 1 = Radius; 2 = Condylus humeri; 3 = Corpus humeri; 4 = Caput humeri; 5 = Collum scapulae).....	94
Abbildung 32: Dreidimensionale Darstellung des Ellbogenknorpels (blau) und Schulterknorpels (orange) durch die Software 3D Doctor®	95
Abbildung 33: Darstellung der Messung des Durchmessers des Ellbogenknorpels.....	95
Abbildung 34: Darstellung der Messung des Durchmessers des Schulterknorpels.....	96
Abbildung 35: Darstellung der Knieknorpel mittels 3D-Doctor®.....	97
Abbildung 36: Ausschnitt aus der coronaren Kniesequenz mittels 3D-Doctor ®	97
Abbildung 37: Messergebnisse aus der DXA-Analyse mit benutzerspezifischer Definition der Regions of Interest (hier Bereich 1 = Ganzkörper).....	99
Abbildung 38: Beziehung zwischen durchschnittlichem Knorpelvolumen am Knie und dem Untersuchungsgewicht (DXA-Gewicht); Adj R-Sq 0.58, Root MSE = 281 mm ³	113
Abbildung 39: Graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Knorpelvolumen an den Femurkondylen im Kniegelenk in mm ³ und der Ganzkörper-Knochenmineraldichte in g/cm ² (BMD).....	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die fünf Freiheiten der Tiere aus Webster (2001)	39
Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Wichtungen nach Jackson et al. (2009)	44
Tabelle 3: Übersicht Artefakte	48
Tabelle 4: Mögliche Ursachen für BMD-Veränderungen, modifiziert nach Carey und Delaney (2017).....	58
Tabelle 5: Scoringsystem von Zoric et al. (2008)	65
Tabelle 6: Klauenboniturscoring von Deen et al. (2009)	66
Tabelle 7: Klauenboniturscoring von Pluym et al. (2011).....	67
Tabelle 8: Klauenboniturscoring von Olsson et al. (2016).....	68
Tabelle 9: Übersicht Scoringsystem von Main et al. (2000)	70
Tabelle 10: Scoring-System nach Karlen et al. (2007).....	71
Tabelle 11: Lahmheits-Scoring des Welfare Quality Protokoll® (2009)	72
Tabelle 12: Lahmheits-Scoring der Zinpro Corporation (2009)	72
Tabelle 13: Lahmheitsscoring von Mustonen et al. (2011).....	73
Tabelle 14: Lahmheitsscoring von Grégoire et al. (2013).....	73
Tabelle 15: 2-Punkt-Ordinal-Skala (2P), modifiziert nach Nalon et al. (2014).....	76
Tabelle 16: Lahmheitsscoring nach Ala-Kurikka et al. (2017)	77
Tabelle 17: Zusammensetzung der Futtermittel in Vor- und Endmast	81
Tabelle 18: Übersicht Versuchsgruppenzusammensetzung	83
Tabelle 19: Parameter der verwendeten MRT-Sequenzen	85
Tabelle 20: Expositionsfaktoren der Untersuchung mittels DXA.....	87
Tabelle 21: Gangbeurteilung, modifiziert nach Main et. al. (2000).....	91
Tabelle 22: Knorpelvolumina im Schulter- bzw. Ellbogengelenk und Durchmesser der Knorpelaufgabe in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM ± SEE)	101

Tabelle 23: Knorpelvolumina im Schulter- und Ellbogengelenk und Durchmesser der Knorpelaufgabe in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE).....	102
Tabelle 24: Knorpelvolumina im Schulter- und Ellenbogengelenk und Durchmesser der Knorpelaufgabe in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE).....	103
Tabelle 25: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM ± SEE)	104
Tabelle 26: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE).....	105
Tabelle 27: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE).....	106
Tabelle 28: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM ± SEE).....	107
Tabelle 29: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE)	108
Tabelle 30: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)	109
Tabelle 31: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM ± SEE).....	110
Tabelle 32: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE)	111
Tabelle 33: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)	112
Tabelle 34: Klauenwinkel in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM ± SEE).....	115
Tabelle 35: Klauenwinkel in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE).....	116
Tabelle 36: Klauenwinkel in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)	117
Tabelle 37: Häufigkeitsverteilung (%) der Lahmheits-Scores 0-3 in Abhängigkeit vom Haltungssystem.....	119

Tabelle 38: Häufigkeitsverteilung (%) des Vorkommens von Bursen in Abhängigkeit vom Haltungssystem.....	119
Tabelle 39: Häufigkeitsverteilung (%) des Vorkommens verschiedener Klauenboniturmerkmale in Abhängigkeit vom Haltungssystem.....	121

1 Einleitung

Lahmheit stellt seit einigen Jahrzehnten eine bedeutende Abgangsursache für Schweine dar. Friendship et al. (1986) vermerkten, dass mehr als 10% der Sauen wegen Fuß- und Beinproblemen gemerzt wurden. Die Kosten, die mit dem Kauf von zusätzlichen Jungsauen zum Ersatz von lahmen Sauen verbunden sind, können erheblich zu den Gesamtherstellungskosten bei der Aufzucht eines abgesetzten Schweines beitragen (Friendship et al., 1986).

Aktuell sind Probleme in der Klauengesundheit, die zu Lahmheit führen, weiterhin ein vorherrschendes Thema in der Schweineproduktion (Olsson et al., 2016). Eine Beinschwäche führt zu einer Verringerung der Lebensdauer von Zuchtsauen (Fukawa und Kusahara, 2001; Nordbø et al., 2018). Aufgrund von Lahmheiten steigen die ökonomischen Verluste in Form von reduziertem körperlichem Wachstum, erhöhtem Antibiotikaeinsatz sowie einem größeren Arbeitsaufwand (Zoric et al., 2008). Je nach Schweregrad der Lahmheit variieren die Kosten von ca. 21 Euro, wenn nur eine Behandlung nötig ist, bis zu ca. 300 Euro in schweren Fällen, wenn die Produktionsstufe betroffen ist und das Tier euthanasiert werden müsste (Willgert, 2011).

Neben den ökonomischen Effekten hat Lahmheit bei Schweinen selbsterklärend einen negativen Einfluss auf das Wohlbefinden der Tiere. Das Wissen über den ökonomischen Einfluss von Klauenläsionen und Lahmheit kann helfen zu verstehen, wie diese Probleme am besten behoben werden können. Die Prävalenz der Lahmheit variiert während des gesamten Produktionszyklus und ist entscheidend für die Risikofaktoranalyse. Dabei ist es wichtig den Fokus auf das Haltungssystem zu legen, um eine Präventionsstrategie zu erarbeiten (Pluym et al., 2013). Zur Durchführung von Korrektur- und vorbeugenden Maßnahmen ist es von großer Bedeutung die Läsionen zu identifizieren und deren Entstehung zu verstehen (Deen et al., 2010). Zuerst sollten mögliche Perspektiven auf Herdenebene herangezogen werden um Missstände zu beheben (Nalon et al., 2013), da ein mangelhaftes Haltungssystem zu Erkrankungen des Bewegungsapparates führen kann und

Einleitung

diese einen frühzeitigen Abgang von Zucht- und Mastschweinen bedingen (Koning et al., 2012).

Das Ziel der vorliegenden Studie ist daher, den Einfluss von zwei verschiedenen Haltungssystemen auf die Klauen- und Gelenksgesundheit beim Mastschwein zu untersuchen und gegebenenfalls Vorteile der einzelnen Haltungssysteme aufzuzeigen. Als Untersuchungsmethoden kamen die Magnetresonanztomographie (MRT), die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA), lineare (Winkel-) Messungen an den Klauen sowie verschiedene Scoringssysteme zum Einsatz, da die Kombination dieser Methoden zur Untersuchung von Haltungssystemen in der Literatur noch nicht beschrieben ist.

2 Kenntnisstand

2.1 Aufbau der Klauen und Gelenke

2.1.1 Klauenschuh

2.1.1.1 Aufbau der Schweineklauen

Die Klaue lässt sich in fünf Segmente einteilen. Sie besteht aus dem Saumsegment (*Limbus*), Kronsegment (*Corona*), Wandsegment (*Paries*), Sohlensegment (*Solea*), und Ballensegment (*Torus digitalis*) (König und Liebich, 2009).

Die äußere Ansicht, ein Quer- und Längsschnitt der Klauen sind in den nachfolgenden Abbildungen 1-3 dargestellt.

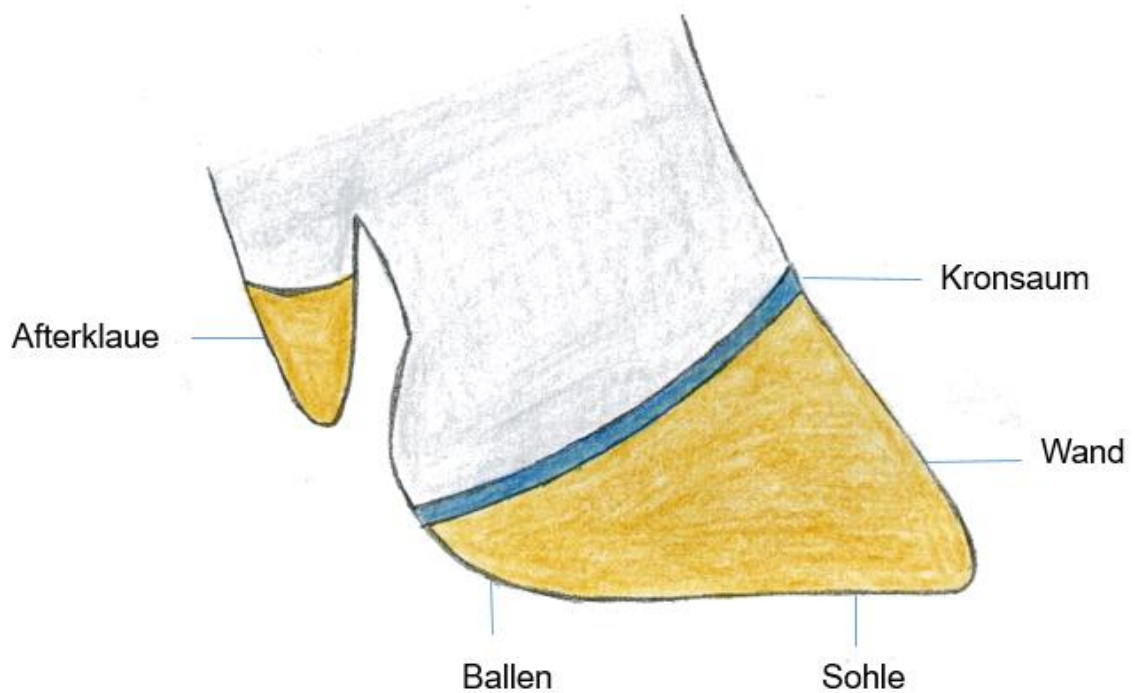


Abbildung 1: Ansicht der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010)

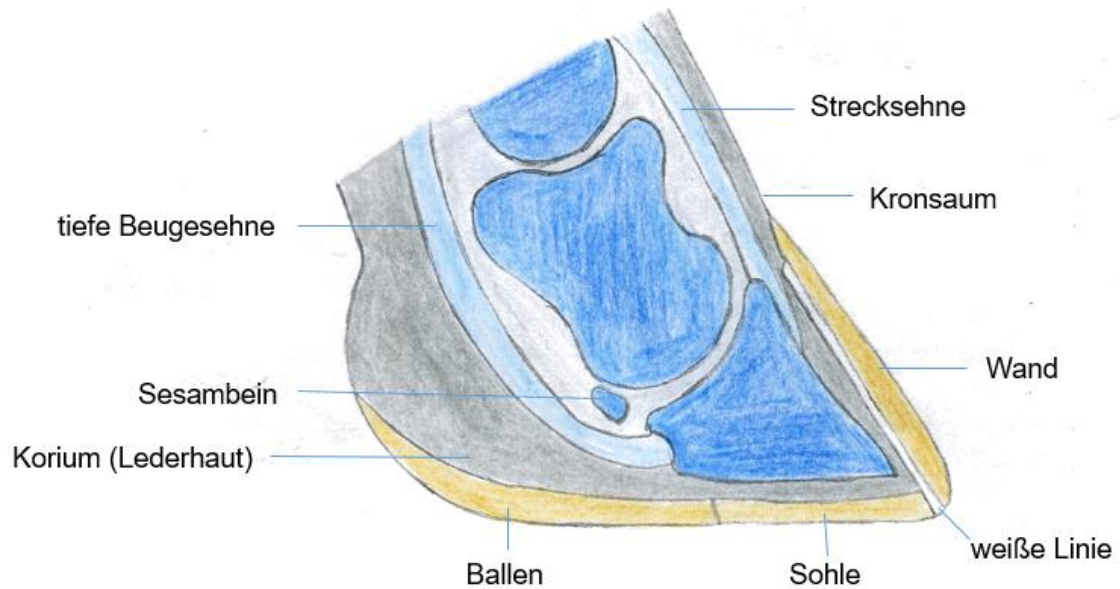


Abbildung 2: Querschnitt der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010)

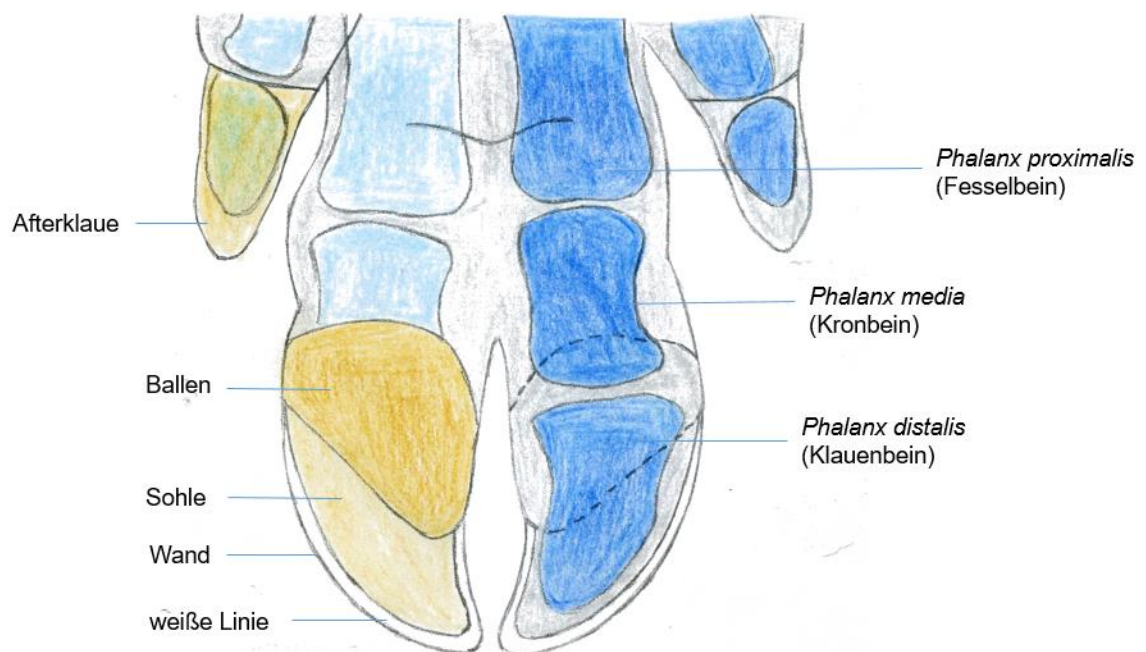


Abbildung 3: Längsschnitt der Klaue, modifiziert nach Deen et al. (2010)

2.1.1.2 Besonderheiten der Klauen beim Schwein

Beim Schwein besitzt neben der 3. und 4. Zehe auch die 2. und 5. Zehe (Afterklauen) ein vollständiges knöchernes Stützskelett. Die Afterklauen stehen

über eine gelenkige Verbindung (echtes Gelenk) mit dem Skelett der Gliedmaßen in Verbindung (Abbildung 4). Eine weitere Besonderheit bei Schweinen ist die Trage- und Stützfunktion der Afterzehen. Die Afterklauen an den Beckengliedmaßen sind höher angebracht, als an den Vordergliedmaßen. Die medialen Afterklauen sind meistens kürzer als die lateralen Afterklauen. Der Ballenbereich des Schweines reicht weit distal und ist vorgewölbt. Somit wird die Hälfte der palmaren bzw. plantaren Fußungsfläche von weichem Ballenhorn (= weiche keratinisierte Epidermis) bedeckt. Die vordere distale Hälfte der Fußungsfläche besteht aus hartem Ballen-, und Sohlenhorn (= harte keratinisierte Epidermis). Am Übergang zwischen Sohle und weichen Ballen entstehen häufig Zusammenhangstrennungen (König und Liebich 2009; Lisgara et al., 2015).

Der Winkel zwischen Vorderwand und Sohle sollte für eine optimale Belastung zwischen 50° und 60° betragen. Bei unzureichender Abnutzung wird dieser Winkel kleiner und die Länge der Klaue größer (Ziron, 2014). Eine physiologische Fußungsfläche ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Physiologische Fußungsfläche

2.1.1.3 Funktionen des *Stratum corneum* (Horn)

Das *Stratum corneum* schützt die Klaue vor Verletzungen, Austrocknung, Flüssigkeitsansammlungen, Temperaturschäden (Hitze/Kälte) und Eindringen von Keimen (König und Liebich, 2009). Das Klauenhorn wächst ca. 10 mm pro Monat, daher ist eine adäquate Abnutzung bzw. ein entsprechender Abrieb durch den Boden des Haltungssystems notwendig (Ziron, 2014).

2.1.2 Aufbau von Gelenken

Echte Gelenke besitzen einen speziellen Aufbau. Folgende Strukturen sind am Aufbau eines echten Gelenkes beteiligt (Baumhoer et al., 2003, Abbildung 5):

- Gelenkflächen
- Gelenkknorpel
- Gelenkhöhle
- Gelenkkapsel
- Synovia
- Bänder

Die Gelenkkapsel bildet den eigentlichen Gelenkraum und besteht aus zwei Schichten. Die äußere Schicht (= Stratum fibrosum) ist derb. Die innere Schicht (= Stratum synoviale) hat Falten und Zotten und sezerniert die Synovia (= Gelenkschmiere), welche der Ernährung des Gelenkknorpels dient (Dahme und Weiss, 1999). Im Kapitel 2.1.6.3 wird auf den Gelenkknorpel genauer eingegangen.

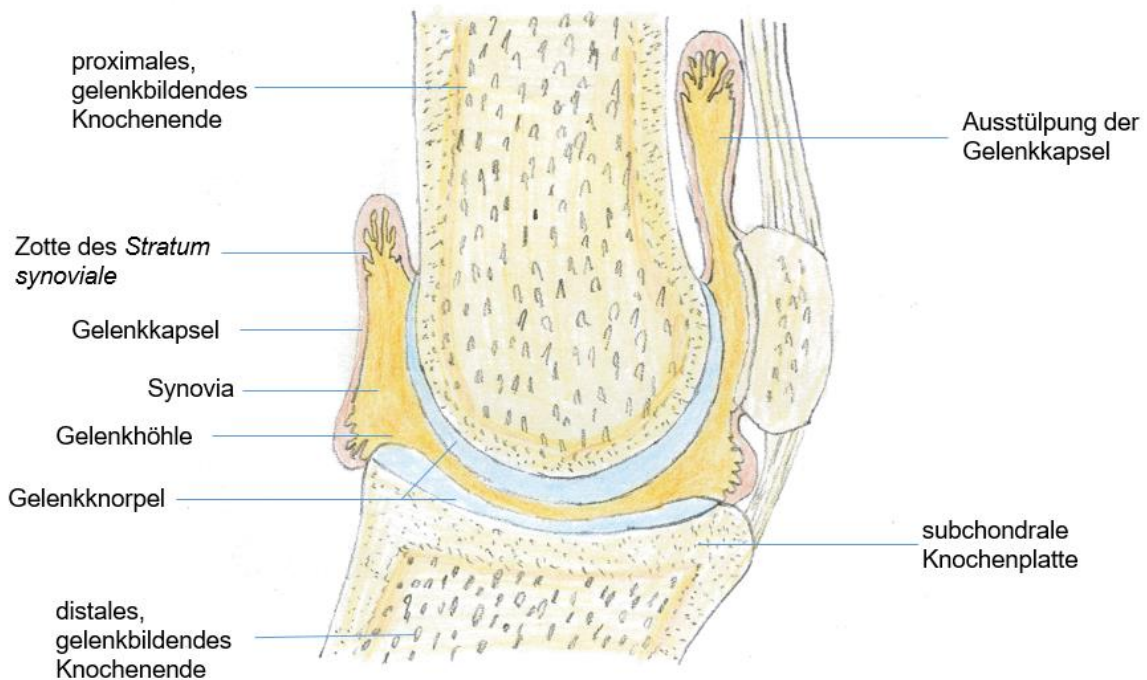


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Gelenkes, modifiziert nach König und Liebich (2009)

2.1.3 Klauengelenk (*Articulationes interphalangeae distales*)

Beim Klauengelenk handelt es sich um ein Sattelgelenk, wo die *Phalanx media* und *Phalanx distalis* sowie das distale Sesambein miteinander verbunden sind. An diesem Gelenk herrschen Streck- und Beugebewegungen vor, aber auch seitliche Bewegungen sind eingeschränkt möglich (Nickel et al., 2004).

2.1.4 Ellbogengelenk (*Articulatio cubiti*)

Das Ellbogengelenk stellt ein zusammengesetztes Walzengelenk dar. Es besteht aus dem *Articulatio humeroulnaris* und *Articulatio humeroradialis*. Das Ellbogengelenk ist eine zweifache Verbindung zwischen der *Trochlea humeri* mit der *Incisura trochlearis ulnae* wie auch der *Fovea capitis radii*. Funktionell ist es ein unvollkommenes Wechsel- oder Scharniergelenk, welches allein Streck- und Beugebewegungen zulässt. Beide Gelenkteile werden von einer Gelenkkapsel umschlossen. Dieses Gelenk wird durch starke Seitenbänder in der Form gehalten (Nickel et al., 2004; König und Liebich, 2009).

2.1.5 Schultergelenk (*Articulatio humeri*)

Im Schultergelenk ist die *Cavitas glenoidalis* der *Scapula* mit dem *konvexen Caput humeri* verbunden. Hierbei handelt es sich um ein Kugelgelenk, welches als Wechsel- oder Walzengelenk wirkt, da der Bewegungsradius durch die angrenzende Muskulatur sehr eingeschränkt ist. Das Schultergelenk ist mit einer geräumigen Gelenkkapsel ausgestattet (Nickel et al., 2004; König und Liebich, 2009).

2.1.6 Kniegelenk (*Articulatio genus*)

Das Kniegelenk stellt ein zusammengesetztes, inkongruentes und unvollkommenes Wechselgelenk dar. Es ist zusammengesetzt aus dem *Articulatio femorotibialis* (Kniekehlgelenk) und dem *Articulatio femoropatellaris* (Kniescheibengelenk) (Nickel et al., 2004; König und Liebich, 2009).

2.1.6.1 Kniekehlgelenk (*Articulatio femorotibialis*)

Beim Kniekehlgelenk handelt es sich um ein inkongruentes, unvollkommenes Wechselgelenk, indem die gekrümmten Kondylen des *Os femoris* (Oberschenkelknochen) mit der ebenen Gelenkfläche der *Tibia* (Schienbein) artikulieren. Jedem *Kondylus* ist ein Meniskus zugeordnet, der die Inkongruenz zu der gegenüberliegenden Gelenkfläche ausgleicht. Das Kniekehlgelenk führt hauptsächlich Beuge- und Streckbewegungen aus und durch die flexiblen Menisken sind auch Drehbewegungen (unvollkommenes Wechselgelenk) möglich. Die Menisken haben die Form einer Apfelsinenscheibe und sind aus Faserknorpel aufgebaut. Die Seitenbänder des Gelenkes sind exzentrisch zur Drehachse befestigt (Spiralgelenk) und die Gelenkkapsel ist geräumig (Nickel et al., 2004; König und Liebich, 2009).

2.1.6.2 Kniescheibengelenk (*Articulatio femoropatellaris*)

Das Kniescheibengelenk ist ein Schlittengelenk. Es artikuliert die *Patella* (Kniescheibe) mit der Kniescheibenrolle des *Os femoris*. Dieses Gelenk besitzt eine weite Gelenkkapsel. Der Kniefettkörper befindet sich zwischen dem *Ligamentum patellare* und der Kniescheibengelenkkapsel (Nickel et al., 2004; König und Liebich, 2009).

2.1.6.3 Gelenkknorpel

Der Gelenkknorpel stellt ein kleines Gewebe mit einer Matrix-Struktur dar (Azuma et al., 2009) und bedeckt die „korrespondierenden Knochenflächen“ bei echten Gelenken (Dahme und Weiss, 1999). Dieses „bläulich durchscheinende“ Gewebe besteht aus hyalinem Knorpel (Sinowatz und Hees, 2006) und ist aus drei Schichten zusammengesetzt, die sich in der Anordnung der Kollagenfasern unterscheiden. Der Knorpel setzt sich aus 60-80 % synovialer Flüssigkeit und 20 - 40 % Matrix mit einem kleinen Volumen an Chondrozyten zusammen. Die synoviale Flüssigkeit ist hauptsächlich aus dickflüssigem Hyaluron und Chondroitinsulfat zusammengesetzt (Azuma et al., 2009). Die Synovia dient der Ernährung des Gelenkknorpels (Dahme und Weiss, 1999). Die synoviale Flüssigkeit und die Oberfläche des geschichteten Gelenkknorpels spielen eine wichtige Rolle, z.B. im Kniegelenk, da sie sowohl eine Motorfunktion als auch eine stoßdämpfende Funktion aufweisen (Azuma et al., 2009).

Der Gelenkknorpel ist nicht innerviert und weist keine Gefäße auf (Dahme und Weiss, 1999). Deswegen ist der Gelenkknorpel durch eine unzureichende Fähigkeit zu Reaktions- und Reparaturmechanismen nach einer Schädigung gekennzeichnet. Knorpelschäden sind erst schmerzhaft, wenn die Synovialis und der subchondrale Knochen mit betroffen sind (MacGavin und Zachary, 2011). Je nach Gelenk und biomechanischer Belastung bestehen unterschiedliche Dicken an hyalinen Knorpelgeweben (Baumhoer et al., 2003).

Mit dem Alter nimmt die elastische Verformbarkeit des Knorpels ab und er wird empfindlicher gegenüber mechanischen Belastungen. Außerdem wird mit steigendem Alter der Gas- und Nährstoffaustausch am Knorpel erschwert und es kann zu nutritiven und hypoxischen Schäden des Knorpels kommen. Eine weitere altersbedingte Veränderung am Knorpel ist die Abnahme der Wasserbindungskapazität durch die Zunahme von Proteoglykanen, die ein höheres Molekulargewicht aufweisen (Dahme und Weiss, 1999). Es ist physiologisch, dass mit zunehmendem Alter der Tiere die Knorpeldicke, die Dichte der Chondrozyten, die Vaskularität und die Durchblutungsrate abnimmt (Nakano et al., 1987).

2.2 Wichtige Erkrankungen des Bewegungsapparates

2.2.1 Osteochondrose (Arthropathia deformans, Osteochondrosis)

Osteochondrose ist ein degenerativer Prozess am Wachstumsknorpel und kommt bei wachsenden Tieren vor (Busch und Wachmann, 2011).

Diese Erkrankung stellt eine fokale oder multifokale Störung der enchondralen Ossifikation dar und betrifft den Gelenk-Epiphysenkomplex und die Wachstumsfuge. Als wichtige Ursache gilt eine mangelhafte Vaskularisierung (= fehlerhafte Gefäßversorgung) des Wachstumsknorpels, welcher sich in den Wachstumsfugen oder den Epiphysen befindet (MacGavin und Zachary, 2011), wichtige Aufgaben im Längenwachstum des Skeletts erfüllt (König und Liebich, 2009) und nur im wachsenden Skelett vorkommt (Hempfling und Krenn, 2016). Das Längenwachstum des Wachstumsknorpels ist essentiell für das spätere Wachstum von Knochen (König und Liebich, 2009). Wachstumsknorpel ist ein gut abgrenzbarer, weißer sowie fester Knorpel und befindet sich unter dem Gelenkknorpel. Somit kann der Prozess der enchondralen Ossifikation und Mineralisierung nicht ablaufen (MacGavin und Zachary, 2011). Auch die Zucht und Selektion von schnellwachsenden Tieren kann die Inzidenz einer Osteochondrose-Erkrankung erhöhen. Die Folge ist eine ischämische Nekrose des Wachstumsknorpels. Eine *Osteochondrose dissecans* beschreibt die Ruptur des Gelenkknorpels und die Ablösung von Knorpelfragmenten (MacGavin und Zachary, 2011). Osteochondrose gilt demnach als Hauptgrund für Beinschwäche beim Schwein (van Grevenhof et al., 2011).

Die Entstehung von Osteochondrose ist multifaktoriell bedingt (Dahme und Weiss, 1999) und wird ätiologisch durch Traumata, genetische Faktoren, schnelles Wachstum, nutritive Faktoren und Ischämie verursacht (Ekman und Carlson, 1998).

Auch Stellungsanomalien und genetisch bedingte Mesenchymschwäche können das Auftreten von Osteochondrose bedingen (Dahme und Weiss, 1999). Es wird vermutet, dass eine mechanische Überbelastung für die relativ hohe Häufigkeit von osteochondrotischen Läsionen auf den tragenden

Oberflächen der Knochen verantwortlich ist. Auch eine schnelle Gewichtszunahme wird mit der Inzidenz von Osteochondrose in Verbindung gebracht (Nakano et al., 1987).

Schulter-, Ellbogen-, Knie-, Tarsal- und Karpalgelenk sind am häufigsten von Osteochondrose betroffen (Dahme und Weiss, 1999), wobei häufig die medialen Abschnitte der Gelenke beteiligt sind (van Grevenhof et al., 2011).

Das Auftreten des Beinschwäche-Syndroms ist wahrscheinlich mit dem Exterieur eines Tieres korreliert. Es ist ein klinisches Syndrom, welches durch Anomalien in Haltung und Gang eines Tieres charakterisiert ist. Indirekte Selektion basierend auf Exterieurmerkmalen wird zur Merzung von Sauen, Ebern und Schlachtschweinen aufgrund von Beinschwäche genutzt (van Steenbergen, 1989). Osteochondrose sowie Stellungs- und Bewegungsanomalien erhöhen das Risiko eines frühzeitigen Ausscheidens der Schweine aus Zucht und Mast. Die Beurteilung der Beschaffenheit der Gliedmaßen und des Gangbildes kann genutzt werden, um als Indikator für Osteochondrose und somit bei der Auswahl von Zuchttieren zu helfen. Schaukelnde Bewegung in der Hinterhand und ein steifer Gang sind signifikant assoziiert mit höheren Scores für Osteochondrose im Femoropatellar- und Tarsocrural-Gelenk. Eine Unterentwicklung der Innenklauen an den Vordergliedmaßen ist verbunden mit niedrigeren Scores für Osteochondrose im Femoropatellargelenk und in der Summe der Osteochondrose-Scores der verschiedenen Gelenke. Die Ausprägung von steilen und schwachen Fesseln an den Vordergliedmaßen sind assoziiert mit größeren Scores für Osteochondrose im Ellbogengelenk ($p = 0,004$). Auch „X-förmige“ Hinterbeine stehen in Verbindung mit höheren Scores für Osteochondrose. Eine steile und schwache Fessel an den Hintergliedmaßen ist assoziiert mit niedrigeren Osteochondrose-Scores im Tarsocrural-Gelenk ($p = 0,05$) (Koning et al., 2012).

Generell gilt, dass sich Osteochondrose im jungen Alter entwickelt und mit Lahmheit in Zusammenhang steht. Es existieren Hinweise, dass die Anwesenheit von natürlichen Antikörpern bei Jungsauen im Alter von 6, 10 und 24 Wochen mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit mit dem Auftreten von Osteochondrose zum Zeitpunkt der Schlachtung im Alter von 24 Wochen

assoziiert ist. Zur Untersuchung auf den Antikörpergehalt werden Blutplasma-Proben benötigt. Die Bestimmung des Antikörpergehalts wird mittels ELISA durchgeführt. Überwiegend wurden Assoziationen von Osteochondrose mit IgM- und IgG-Antikörpern gefunden, welche im Alter von 6 Wochen gemessen wurden. Der Nutzen dieser Methode als *In-vivo*-Indikator für Osteochondrose benötigt jedoch noch weitere Untersuchungen (Koning et al., 2015).

2.2.2 Bursitis (Bursae auxiliares)

Als Ursache für Hilfsschleimbeutel gilt eine mechanische Überbeanspruchung von exponierten Stellen am Tierkörper, welche zum Beispiel durch die Haltung auf Spaltenboden hervorgerufen wird und nicht embryonal angelegt ist (Gareis et al., 2016). Gillman et al. (2008) haben zwei Hypothesen für die Entstehung von Bursen aufgestellt: sie könnten durch Liegen der Schweine auf Boden ohne Einstreu bzw. Spaltenboden in Kombination mit dem Gewicht der Tiere oder durch Stöße an den Gliedmaßen bedingt sein, welche die Tiere sich beim Umherlaufen in der Bucht zugezogen haben.

Bursen treten an verschiedenen Lokalisationen mit verschiedenen Prävalenzen auf (Abbildung 6). Lateroplantare Bursen existieren am häufigsten mit einer Prävalenz von 41,8 %, gefolgt von plantaren Bursen (12,0 %) und medialen Bursen (4,8%). Das geringste Risiko für das Entstehen von Bursen besteht bei planbefestigtem Betonboden mit Tiefstreu (>10 cm). Die Prävalenz an einer Bursitis zu erkranken erhöht sich bei Haltung auf planbefestigtem Betonboden mit wenig Einstreu (<10cm), Teilspalten- oder Vollspaltenboden. Es bestehen zudem signifikante Assoziationen zwischen dem Auftreten von Bursen und Klauenverletzungen (Mouttotou et al., 1998a).

Außerdem weisen Mastschweine mit Bursitis eine signifikante Reduktion des Magerfleisch-Gehaltes im Schlachtkörper auf ($p < 0,01$), während keine Assoziationen mit Schlachtag, Geschlecht oder Schlachtkörpergewicht festgestellt wurden (Mouttotou et al., 1998b).



Abbildung 6: *Bursitis am linken Sprunggelenk*

2.2.3 Panaritium

Ein Panaritium ist eine Entzündung im Bereich des Kronsaums und entsteht durch feine Verletzungen. In diese Läsionen gelangen bakterielle Erreger wie *Fusobacterium necrophorum* und *Bacteroides melaninogenicus* (MacGavin und Zachary, 2011). Die dabei entstehende Entzündung ist ringförmig, oberflächlich begrenzt, die Haut am Kronsaum ist geschwollen, gerötet, vermehrt warm und druckempfindlich. Im Bereich unter dem Kronsaum entstehen Eiteransammlungen. Bei einem tiefen Panaritium liegt eine tiefe, eitrig-nekrotisierende Entzündung im Bereich von Kronbein und Klaue vor (Heinritzi et al., 2006).

Als Ursachen sind Verletzungen durch übermäßigen Hornabrieb oder mangelhafte Haltungssysteme (unebene, harte Böden; defekte Spaltenböden) beschrieben. Symptomatisch zeigen die Tiere eine hochgradige

Stützbeinlahmheit und eine Phlegmone im Bereich des Kronsaums (Abbildung 7). Sowohl eine eitrige Einschmelzung der betroffenen Knochen als auch eine Demarkation ist möglich. Fieber und eine Vergrößerung der Inguinallymphknoten sowie Fistelbildung am Kronsaum stellen weitere Symptome dar. Behandelte Tiere benötigen eine weiche Aufstallung (zum Beispiel auf Stroh). Essentiell für die Therapie ist die Beseitigung der Ursachen in der Haltungsumwelt der Tiere (Heinritzi et al., 2006).

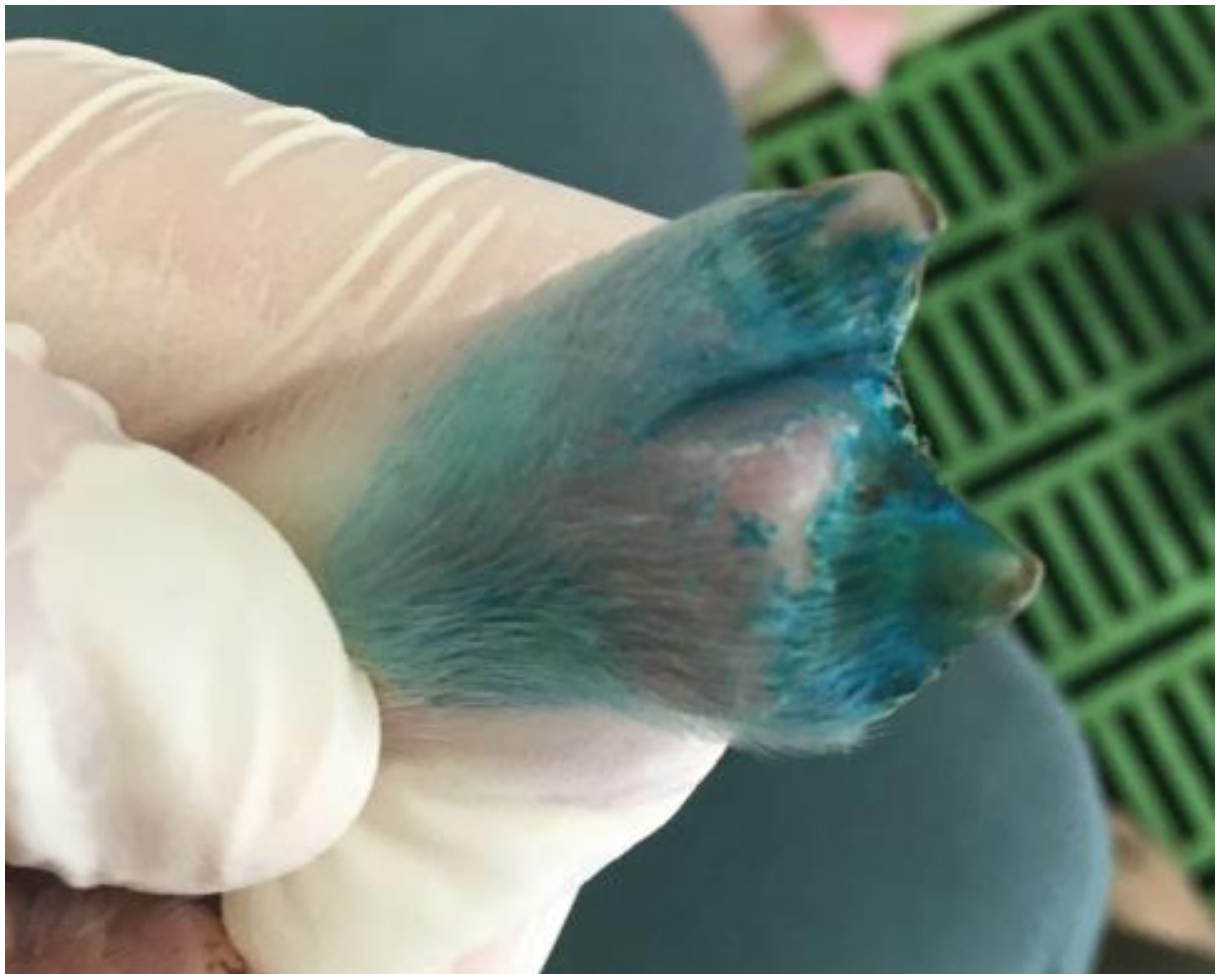


Abbildung 7: *Panaritium bei einem Ferkel*

2.2.4 Durch Technopathien bedingte Klauenläsionen

Technopathie beschreibt das Auftreten von krankhaften Veränderungen und Verletzungen an Tieren, welche in einem Zusammenhang mit der Haltungsumwelt der Tiere stehen (Ziron, 2014).

Fast jede Sau hat nach Pluym et al. (2011) ein oder mehrere Klauenläsionen und lediglich 0,95 % der Sauen zeigten keine Läsionen. Mit dem Alter der Tiere steigt auch das Risiko für Klauenläsionen (z.B. durch überlange Klauen bzw. Afterklauen- oder andererseits unterentwickelte Klauen wie in Abbildung 8, sowie Risse im Wandhorn) an. Es wurden signifikant mehr Klauenläsionen an den lateralen als an der medialen Klaue festgestellt. Klauenläsionen sind eine der Hauptursachen für schwere Lahmheiten, die vor allem durch überlange Klauen- und Afterklauen verursacht werden (Tinkle et al., 2017). Schon oberflächliche Läsionen können Schmerzen und Unbehagen verursachen, wobei einige Läsionen erst nach einer Präparation der Klaue zum Vorschein kommen (Deen et al., 2010).

Klauenläsionen können bereits am lebenden Tier beurteilt werden, während andere lahmheitsbedingte Erkrankungen erst mittels Sektion diagnostiziert werden können (Nalon et al., 2013). Die Region der Ferse und der Wand sind am häufigsten von Klauenläsionen betroffen (Pluym et al., 2011). Ein frühzeitiges Erkennen von Klauenveränderungen kann die vorzeitige Merzung von Schweinen verhindern (Ziron, 2014).



Abbildung 8: *Hochgradige Unterentwicklung der Innenklaue*

2.2.4.1 Entzündung

Eine Entzündung kann für eine Vielzahl von Läsionen am Fuß des Schweines verantwortlich sein. Abszesse und fokale Nekrosen führen zu Perforationen oder Geschwüren im Bereich der Ferse oder Sohle, wenn an dieser Stelle die Hornproduktion längere Zeit unterbrochen war. Dies verursacht starke Schmerzen und Schwellungen. Durch eine chronische Entzündung des Koriums wird die metabolische Aktivität erhöht und es folgt daraus übermäßiges Hornwachstum und selektiv vergrößerte Klauen. Dabei treten häufig Indizien für entzündliche Prozesse im Korium auf, wie Prellung und Verfärbungen der Hornkapsel, Abblättern von Horn und Rillenbildung (Deen et al., 2010).

2.2.4.2 Trauma

Ein physisches Trauma, welches durch Faktoren wie defekter Bodenbelag oder Überbelegung verursacht wird, kann zu multiplen Klauenläsionen führen, die mit sofortigen oder chronischen Schmerzen einhergehen (Abbildungen 9, 10). Als

Folge können horizontale und lineare Blutungen in Wandhorn auftreten. Oft ist nur eine einzelne Klaue oder ein Fuß betroffen. Die Blutungen treten anfänglich am Kronsaum auf, wo das neugebildete Wandhorn noch weich ist. Während des Heilungsprozesses lagert sich neues Wandhorn unter dem Blut ab und umschließt die Rückstände in einer Spalte an der Haut-Epidermis-Verbindung. Die Folge ist ein Defekt, welcher als horizontaler Wandriss parallel zum Kronsaum erscheint. Unterbrochene oder reduzierte Hornproduktion verursacht horizontale Rillen in der Wand (Deen et al., 2010).

Druckstellen (Blutergüsse) stellen Quetschungen und Blutungen der Lederhaut dar. Diese können sehr schmerzhaft sein und haben ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Hornqualität (Ziron, 2014). Ein wiederholtes Trauma verursacht mehrere parallele lineare Quetschungen oder Risse. Eine gleichzeitige Verletzung, insbesondere auf Grund eines Traumas durch Überbelastung, verursacht Blutungen und eine Anhäufung von Blut an der Haut-Epidermis-Verbindung in der Sohle bzw. der Ferse. Außerdem wird dort die Produktion von neuem Horn verhindert. Blut und Trümmer werden ebenfalls allmählich von neuen Hornschichten bedeckt und erscheinen als rote bis schwarze Schicht. Sobald die Flüssigkeit absorbiert ist, entwickelt sich eine Spalte, die zu einer doppelten Sohle oder Ferse führt (Deen et al., 2010).



Abbildung 9: *Einblutung im Wandhorn*



Abbildung 10: *Hochgradige Wandhornabschürfung*

2.2.4.3 Ballenveränderungen bzw. Sohlendefekte

Es kommt zu einer Verhärtung und Wucherung am Ballenhorn (Ziron, 2014). Eine Überwucherung der Ferse wird durch chronische Überbelastung induziert, die an der Ferse eine Hyperkeratisierung der Epidermis verursacht. Wenn ein Ferkel altert bzw. wächst, wird das Gewicht an den Vorder- und Hintergliedmaßen langsam auf die äußeren Klauen übertragen. Die Ferse trägt das größte Gewicht und als Reaktion wird zusätzliches Horngewebe produziert. Mit der Zeit berührt die innere Klaue nicht mehr oder kaum den Boden. Somit wird fast die gesamte Last von der äußeren Klaue getragen (häufig nur Ferse) (Deen et al., 2010). Ballenveränderungen sind entsprechend die Folge einer hohen Druckbelastung, die mit zunehmendem Alter bzw. Gewicht häufiger vorkommen (Ziron, 2014).

Übermäßiger Druck auf die Ferse verursacht Schmerzen, Blutungen sowie Entzündungen. Daraus folgt schließlich eine Ansammlung von überschüssigem Horngewebe an der Ferse, welches sich aufspalten kann. Eine überwucherte Ferse entwickelt sich durch mechanische Ursachen und führt zu Blutergüssen, Hornspalten, Erosionen und Ulzerationen bis zum Totalverlust der Klaue (Abbildung 11). Die Kombination mit minderwertigem Horn prädisponiert die Klauenkapsel für Risse in der weißen Linie, der Ferse und der Seitenwand (Deen et al., 2010).

Generell werden Sohlendefekte als Stauung und Quetschung des Sohlenkoriums definiert, welche sich als dunkelrote Pigmentierung auf der volaren Fläche des Fußes darstellt (Zoric et al., 2008). Da die Klauen auf weichen Oberflächen dazu neigen, langsamer abgerieben zu werden, kann eine Überwucherung des Horns entstehen. Wenn das geschieht, wird der Winkel zwischen der kranialen Oberfläche der Wand und der Sohle spitzer und die Sohle tendiert dazu eher konkav als flach zu sein. Dadurch konzentriert die Gewichtsverteilung den Druck zunehmend auf das Wandhorn, was Wandläsionen wahrscheinlicher werden lässt (Moultotou et al., 1999a).



Abbildung 11: Hochgradiger Sohlendefekt

2.2.4.4 Überlange Klauen/ Stallklauen

Stallklauen sind schnabelförmig verlängerte deformierte Klauen (Heinritzi et al., 2006). Sie entstehen durch eine mangelhafte Abnutzung des Klauenhorns, welche durch zu weichen Boden (Tiefstreu) (Heinritzi et al., 2006; Ziron, 2014) oder mangelnde Bewegung der Schweine hervorgerufen wird (Heinritzi et al. 2006). Die verlängerten Klauen führen zu einer Veränderung des Vorderwandwinkels (Ziron, 2014). Sowohl die Hauptklauen als auch die Afterklauen können dabei betroffen sein. Die Folge von Stallklauen sind dann häufig Stellungsanomalien, Lahmheiten, Hornrisse, Lederhautverletzungen sowie Infektionen. Die Tiere zeigen dabei eine Stützbeinlahmheit und ein steifes Gangbild mit einem Tiefstand der Fessel sowie verminderter Bewegung (Heinritzi et al., 2006). Gleichzeitig werden die Gelenke und Sehnen vermehrt

belastet (Ziron, 2014). Durch die Sehnenüberlastung und den Fesseltiefstand kann es zum Einrollen des seitlichen Wandhornes, der sogenannten Rollklauenbildung (Abbildung 12) kommen (Heinritzi et al., 2006).

Wegen der überlangen Klauen wird die Fortbewegung behindert, und somit können auch Verletzungen am Kronsaum entstehen. Häufig treten horizontale Parallelblutungen auf und es besteht ein höheres Risiko, dass die Klauen in den Spalten hängenbleiben und abreißen. Auch eine chronische Entzündung des Koriums führt zu einer erhöhten metabolischen Aktivität mit einem beschleunigten sowie über- und unregelmäßigem Wachstum des Wandhorns (Deen et al., 2010). Bei einer verlängerten Klaue setzt sich Schmutz im Hohlraum ab, welcher sich auf dem kranialen Teil der volaren Oberfläche befindet, und dies prädisponiert für eine Zehenerosion (Mouttotou et al., 1999a).

Lisgara et al. (2015) haben in einer Studie Klauenläsionen an Sohle, Ferse, weiße Linie, Wand, Kronsaum, Zehe und Afterklaue sowie Lahmheit bei Schweinen in drei verschiedenen griechischen Betrieben untersucht. In dieser Untersuchung kamen überlange Klauen und Afterklauen neben Fersenläsionen am häufigsten und häufig in hochgradiger Form vor. Ältere Sauen waren häufiger betroffen als jüngere Sauen (Lisgara et al., 2015).



Abbildung 12: Rollklauenbildung

2.2.4.5 Überlange Afterklauen

Schweine mit überlangen Afterklauen können leichter in den Spalten des Haltungssystems hängenbleiben und somit besteht ein erhöhtes Risiko für einen Afterklauenabriss (Pluym et al., 2011; Ziron, 2014). Durch den Abriss der Afterklaue wird das gut innervierte Korium freigelegt, welches für das Tier sehr schmerzhaft ist (Pluym et al., 2011). Diese Verletzungen bluten stark und es können Infektionserreger über die Wunde eindringen (Ziron, 2014). Daher haben Afterklauenverletzungen eine große klinische Bedeutung. Schweine mit hohen Scores betreffend das Merkmal „überlange Afterklauen“ sind signifikant häufiger lahm (Pluym et al., 2011).

2.2.4.6 Hornspalten/ Hornrisse

Hornspalten stellen Zusammenhangstrennungen im Verlauf der Hornröhrchen dar, welche häufig kaudolateral an der äußeren Klaue entstehen. Sobald der

Defekt bis zur Lederhaut reicht, zeigt das betroffene Tier eine Lahmheit. Außerdem können durch den Defekt eitrig-nekrotisierende Entzündungen entstehen (Heinritzi et al., 2006).

Risse der Seitenwand verlaufen vertikal oder schräg von der Bodenoberfläche in der abaxialen Seitenwand bis zum Kronsaum (Abbildung 13). Diese Risse sind oft mit einer Überwucherung der Ferse verbunden. Schmerzen entstehen, wenn der Riss tief ist und bis zur Lederhaut (Korium) reicht oder Keime eindringen und eine Infektion verursachen. Zusammenhangstrennungen am Übergang von Ferse und Sohle verlaufen zwischen der weichen Ferse und der harten Sohle. Auch diese Läsion ist häufig mit einer Überwucherung der Ferse verbunden und kann schmerzhaft sein, wenn der Riss bis zur Lederhaut reicht. Ein horizontaler Wandriss verläuft parallel zum Kronsaum und ist immer mit Blutungen verbunden (Deen et al., 2010).

Besonders gefährdet für die Entstehung von Hornspalten und Hornrissen ist zu trockenes Horn und Wandhorn, welches hohen mechanischen Belastungen (z.B. durch zu lang gewachsene Klauen) ausgesetzt ist (Heinritzi et al., 2006; Ziron, 2014).

Als Ursache kann auch ein Trauma, zum Beispiel aufgrund von defekten Spalten oder rutschigen Oberflächen in Betracht kommen mit Folge von linearen Blutungen am Kronsaum. Während des Heilungsprozesses bildet sich neues Wandhorn unter dem Blut, welches den Defekt in einer Spalte in der Wand umschließt und ein horizontaler Riss erscheint parallel zum Kronsaum. Dorsale Wandrisse entstehen am Kronsaum und reichen über den Klauenrücken bis zur distalen Zehenspitze oder umgekehrt. Sie entstehen wahrscheinlich durch überlange Klauen, wodurch vermehrt Kräfte auf die dorsale Wand wirken und es kommt zu einer Spaltung der Hornkapsel. An der Wand und den weicheren Bereichen der Klaue verlaufen Risse in der abaxialen weißen Linie. Sie beginnen gewöhnlich in der Ferse und erstrecken sich entweder in Richtung der Zehenspitze, dem Übergang Ferse/ Sohle oder in die Sohle selbst. Risse der weißen Linie können durch überwucherte Fersen, Klauenrehe, mechanische Faktoren und mangelhafte Ernährung bedingt sein. Eine überwucherte Ferse kann Risse verursachen, wenn der erhöhte Druck in

Kombination mit übermäßiger Bewegung das Horn zwischen der weichen Ferse und den härteren Wandsegmenten zum Brechen bringt. Das Horn wird brüchig und Risse entstehen. Scherkräfte an der abaxialen Wand können durch Kämpfe der Schweine auf Spaltenboden verstärkt werden und zu Rissen sowie schmerzhaften Verletzungen führen (Deen et al., 2010).



Abbildung 13: Tiefer Wandriss

2.2.4.7 Hornklüfte

Hornklüfte stellen querverlaufende Veränderungen im Wandhorn dar, welche auf fehlerhaftes Wachstum des Hornes zurückzuführen sind. Es existieren zwei Arten von Hornklüften: oberflächliche Hornklüfte und tiefe Hornklüfte. Als Ursache gelten scharfkantige Spalten und ein zu großer Spaltenabstand. Sie weisen oft die Form eines Halbmondes auf (Heinritzi et al., 2006).

2.3 Einflussfaktoren auf die Klauen- und Gelenksgesundheit beim Schwein

Lahmheit ist ein multifaktoriell bedingter Zustand bei Schweinen, der sowohl auf betrieblichen als auch auf genetischen Effekten beruht. Herdengesundheit, Ernährung, Traumen, Bodenbeschaffenheit und Gruppenmanagement sowie Beschaffenheit der Gliedmaßen spielen eine Rolle in der Entwicklung von Lahmheit (Nalon et al., 2013).

2.3.1 Haltung

Erkrankungen der Klaue stehen in enger Verbindung zum Stallboden (Bodenfeuchtigkeit und Bodenunebenheiten), zur Klauenschuhgröße, Hornqualität und zur Stellung der Gliedmaßen. Der ideale Boden für Schweine „soll trittsicher, abriebfest und thermoneutral sein und den Tieren ausreichenden Liegekomfort bieten (Heinritzi et al., 2006), da auf planbefestigten, rutschigen Böden die Schweine leicht ausrutschen können (Waldmann et al., 2004; Thorup et al., 2007). Darüber hinaus muss der Boden auf die jeweilige Altersgruppe ausgerichtet sein“ (Heinritzi et al., 2006). Auch das Stallklima und der Hygienestatus haben einen Einfluss auf die Klauengesundheit (Ziron, 2014). Stroh, welches feucht ist, einen alkalischen pH-Wert besitzt und mit tierischen Fäkalien verschmutzt ist, macht das Horn weicher, wodurch die Fähigkeit des Horns, dem Druck und Abrieb zu widerstehen, vermindert wird. Der Bodentyp ist ein wichtiger Faktor in der Entwicklung von Fußläsionen (Mouttotou et al., 1999a). Übergänge aus Beton (z.B. Treppen), die vom Tiefstreubereich zum Fressbereich führen, können ebenfalls Verletzungen (z.B. Afterklauenverletzungen) nach sich ziehen. Durch eine gute Strukturierung des Haltungssystems können Klauenverletzungen und unruhiges Verhalten in der Tiergruppe minimiert werden (Ziron, 2014).

In der Literatur sind zahlreiche Studien zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Haltungssysteme auf die Klauen- und Gelenksgesundheit beim Schwein beschrieben. Nachfolgend werden einige dieser Studien vorgestellt.

Mouttotou et al. (1999) haben die Assoziationen zwischen individuellen Fußläsionen und verschiedenen Bodentypen bei 4038 Mastschweinen in 21 Betrieben untersucht. Die Gesamt-Prävalenz von Fußläsionen betrug 93,8%.

Schweine, welche auf eingestreuten Böden gehalten wurden, zeigten eine geringere Prävalenz von Sohlenerosionen, Fersenerosionen und Fersen-Flaps sowie eine höhere Prävalenz von Weiße-Linie-Defekten, Rissen, Separationen der Wand und Zehenerosionen als Schweine auf planbefestigten, uneingestreuten Betonböden. Teilspaltenböden wurden assoziiert mit einer steigenden Prävalenz von Fersenerosionen, Fersen-Flaps, Weiße-Linie-Defekten, Separationen der Wand und Rissen. Vollspaltenböden wurden assoziiert mit einer steigenden Prävalenz von Sohlenerosionen und Fersen-Flaps. Klauenläsionen treten als Ergebnis einer erhöhten, ungleichmäßigen Druckverteilung an der gewichtstragenden Oberfläche der Klauen bei der Haltung auf Spaltenböden auf. Wenn die Breite der Spalten erhöht wird, die Ränder der Spalten zerbrochen oder abgenutzt sind, kommt es zu einer Druckerhöhung auf den Teil der Klaue, der mit dem Boden in Kontakt steht, weil die Belastung des Fußes gleich bleibt, aber der Kontaktbereich vom Fuß mit dem Boden verringert ist. Wenn ein Spaltenboden mit weiten Spalten nass ist, dann besteht die Gefahr, dass die Klauen in die Spalten rutschen und eingeklemmt werden. Läuft das Tier auf einem völlig planbefestigten Boden, sollte dieser Boden eine normale Druckverteilung unter dem Fuß bieten und weder rutschig noch abrasiv sein. Der Staudruck auf die gewichtstragende Oberfläche des Fußes wird verringert, wenn die Tiere auf einem elastischen Boden (z.B. mit Tiefstreu) laufen. Dies könnte erklären, warum Läsionen auf der volaren Oberfläche der Füße (Sohlenerosionen, Fersenerosionen, Fersen-Flaps) bei den auf Stroh gehaltenen Schweinen weniger häufig auftraten. Eingestreute Böden eliminieren keine Fußprobleme. Auf Stroh gehaltene Schweine haben mehr Wandläsionen (Hornrisse, Separationen der Wand) und Zehenerosionen als Schweine auf planbefestigten Böden (Mouttotou et al., 1999a).

Mouttotou et al. (1999b) haben die Prävalenz und die Risikofaktoren für das Auftreten zufälliger Bursen bei 912 Vormast-Schweinen (30-65kg) und Endmastschweinen (66-90kg) aus 20 verschiedenen Haltungssystemen untersucht. Die Gesamtprävalenz von bursalen Läsionen betrug 63,4%. Bursen wurden an verschiedenen Seiten des Sprunggelenkes gesehen: lateropltantar,

plantar, medial und an der Spitze des Sprunggelenkes. Am häufigsten war die lateroplantare Seite (54,4%) betroffen, gefolgt von der plantaren (12,5%), der medialen (2,0%) und der Spitze des Sprunggelenkes (0,7%). Es gab keine Unterschiede in der Verteilung, ob das linke oder rechte Sprunggelenk betroffen ist. Bursen wurden bei Schweinen von der 8. bis 28. Lebenswoche beobachtet, und die Prävalenz stieg mit dem Alter an. Voll eingestreute Buchten ($OR = \text{Quotenverhältnis} = 0,11$) oder nur ein eingestreuter Liegebereich ($OR = 0,29$) stellten die wichtigsten Faktoren dar, um das Risiko für Bursen zu senken. Ein nasser Güllefilm im Kotbereich ($OR = 1,67$) und ein Unterschied vom befestigten Bereich und den Spalten von $>3\text{cm}$ wurden signifikant assoziiert mit einem steigendem Risiko für bursale Läsionen (Mouttoto et al., 1999b).

Anil et al. (2007) fertigten eine Analyse zur Charakterisierung von Klauenläsionen und Faktoren, welche mit den verschiedenen Typen von Klauenläsionen assoziiert sind, an. Es wurden 184 Sauen während des Aufenthaltes im Abferkelsystem am Tag 110 der Trächtigkeit auf Klauenläsionen mit Assoziation auf Körperkondition, Fruchtbarkeit und Haltungssystem untersucht. Bei 88,6% der Sauen war mindestens eine Läsion an mindestens einer Klaue an der Wand und im Fersenbereich vorhanden. 86,4% der Sauen zeigten stärkere Läsionen an den Vordergliedmaßen und an den lateralen Klauen. Die Wahrscheinlichkeit von Wandläsionen an jeder Klaue war am Tag 109 der Trächtigkeit mit steigendem Körpergewicht erhöht. Sauen ohne Lahmheitsanzeichen hatten mit geringerer Wahrscheinlichkeit Weiße-Linie-Defekte als lahme Sauen. Sauen in Buchten mit elektronischen Fütterungsanlagen hatten mehr Klauenläsionen an jeder Klaue als Tiere in den Buchten ohne elektronische Fütterung. Unter diesen Studienbedingungen waren Lahmheit und jüngere Parität assoziiert mit Weiße-Linie-Defekten (Anil et al., 2007).

Thorup et al. (2007) untersuchten das Gangbild von Schweinen auf trockenem planbefestigtem Betonboden zur Beurteilung der Anpassung des Ganges an die Bodenbeschaffenheit. Kinematische (50 Hz Videoaufnahmen in der sagittalen Ebene) und kinetische (1kHz Kraftmessplatte, die drei senkrechte Bodenreaktionskräfte misst) Daten wurden erfasst. Die Schweine liefen auf

trockenen, schmierigen und nassen Böden. Die Ergebnisse der Ganganalyse zeigten, dass die Schweine ihren Gang durch das Absenken der Laufgeschwindigkeit auf schmierigen und nassen Böden im Vergleich zu trockenen Böden an die potenziell rutschigen Böden anpassten. Außerdem verkürzten die Schweine ihre Schrittlänge und verlängerten ihre Standphasendauer auf schmierigem Boden im Vergleich zu trockenen oder nassen Böden. Die Schweine liefen in einem 4-Takt-Gang. Die Vorderbeine trugen mehr Last, waren höheren vertikalen Kräften ausgesetzt und hatten länger anhaltende Standphasen als die Hinterbeine. Ein hoher Reibungskoeffizient ($>0,63$) wird benötigt, um ein Rutschen der Schweine zu verhindern und somit ein sicheres Gehen auf trockenem Betonboden zu gewährleisten (Thorup et al., 2007).

Zoric et al. (2008) haben in einem Betrieb mit drei verschiedenen Abferkelsystemen 390 Ferkel bis zu einem Alter von 3 Wochen in Bezug auf Hautwunden und Abschürfungen untersucht. Lahmheiten wurden erfasst bis zu einem Alter von 7 Wochen. Die schwersten Abschürfungen an Karpus und Sohlen wurden im System mit einem „neuen“ planbefestigten Betonboden mit einem Spaltenboden im Kotbereich festgestellt. Das geringste Ausmaß wurde in Tiefstreusystemen mit Torf beobachtet. Sohlendefekte kamen im Haltungssystem mit Betonboden signifikant häufiger vor als im Tiefstreusystem mit Torf. Die Läsionen nahmen mit der Zeit ab und ca. 75% der Lahmheitsbehandlungen wurden in den ersten drei Lebenswochen durchgeführt. Die Gesamtprävalenz der Lahmheit war am höchsten im Haltungssystem mit einem planbefestigten Betonboden mit einem Spaltenboden im Kotbereich (9,4%), gefolgt von dem „alten“ planbefestigten Betonboden (7,5%). Eine niedrigere ($p<0,05$) Prävalenz wurde im Tiefstreusystem mit Torf (3,3%) beobachtet. Das Tiefstreusystem mit Torf stellt einen weichen und guten Boden für Ferkel dar. Die Hautläsionen waren generell bilateral (Zoric et al., 2008).

Das Haltungssystem beeinflusst auch das Auftreten von Osteochondrose in verschiedenen Gelenken. Schweine, welche auf Vollspaltenboden gehalten werden, sind signifikant häufiger von Osteochondrose im Ellbogen- und

Tarsocrural-Gelenk betroffen als auf Tiefstreu gehaltene Schweine (van Grevenhof et al., 2011).

Etterlin et al. (2014) untersuchten die Effekte von Freilandhaltung und konventionellen Haltungssystemen auf die Gelenkgesundheit von Mastschweinen. Es wurde die Prävalenz von Osteochondrose im Ellbogen- und Sprunggelenken von 91 gekreuzten Hampshire-Mastschweinen in einem Freilandhaltungssystem (mit Innen- und Außenbereich) mit 45 Schweinen in einem konventionellen Innenhaltungssystem verglichen. Ein größerer Anteil der Schweine in Freilandhaltung im Vergleich zum konventionellen Innenhaltungssystem zeigte Osteochondrose in den Ellbogengelenken (69% vs. 50%; $p < 0,05$). Ein größerer Anteil von diesen Gelenken bei den Schweinen in Freilandhaltung wies mittelgradige oder hochgradige Läsionen (33% vs. 16%; $p < 0,05$) auf. Die Schweine in der Freilandhaltung zeigten auch eine höhere Prävalenz von Osteochondrose in den Sprunggelenken (83% vs. 62%; $p < 0,05$), und ein größerer Anteil dieser Gelenke hatte mittelgradige oder hochgradige Läsionen (69% vs. 33%; $p < 0,001$) zur Folge. In diesem Versuch war die Prävalenz von Osteochondrose in den Ellbogen- und Kniegelenken höher und die Läsionen schwerwiegender bei den Schweinen aus Freilandhaltung als im konventionellen Stallhaltungssystem. Dies deutet darauf hin, dass Freilandhaltung das Risiko erhöht an Osteochondrose zu erkranken. Ein erhöhter biomechanischer Stress auf gefährdete Gelenkstrukturen könnte der Mechanismus hinter diesem Effekt sein. Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass bei der Freilandhaltung von Schweinen die Modifizierung des Haltungssystems wichtig ist und die Gelenke durch die Zucht besser an die Belastungen bei der Bewegung im Freiland angepasst werden müssen (Etterlin et al., 2014).

2.3.2 Genetik

2.3.2.1 Deutsche Landrasse als Beispiel einer Mutterrasse

Die Deutsche Landrasse (DL) ist die am weitesten verbreitete Mutterrasse in Deutschland und wird sehr häufig zur Erzeugung von Kreuzungstieren eingesetzt (Weiß et al., 2011). Die Tiere dieser Rasse sind großwüchsig, haben

einen langen Körper und sind gekennzeichnet durch weiße Haut mit weißen Borsten (Sambraus, 2016). Durch diese Rasse werden eine gute Fruchtbarkeit, hohe Tageszunahmen (Weiß et al., 2011) sowie eine gute Fleisch- und Aufzuchtleistung vererbt (Sambraus, 2016). Bei den heutigen Sauen der Deutschen Landrasse handelt es sich um stressresistente Reinzuchtsauen, deren besonderes Merkmal die rassetypischen Schlappohren sind (Weiß et al., 2011). Im Unterschied zum früheren Landrasse-Typ weisen heutige Schweine der Landrasse eine dünnere Haut, eine schwächere Behaarung, einen schlankeren Kopf und ein feineres Fundament auf (Granz, 1985).



Abbildung 14: Deutsche Landrasse Sau

2.3.2.2 Piétrain als Beispiel einer Vatterrasse

Piétrain (Pi) ist eine aus Belgien stammende Vatterrasse mit schwarzen oder dunkelbraunen Flecken auf grauweißem Grund. Sie weisen einen gedrungenen und kurzen Rumpf auf (Weiß et al., 2011). Außerdem haben sie einen mittelrahmigen Körperbau, einen massigen Schinken, breite fleischige Schultern und kurze Stehohren (Sambraus, 2016). Besondere Merkmale sind

der hohe Fleischgehalt (Weiß et al., 2011), der geringe Fettansatz (Sambras, 2016) und die gute Futterverwertung (Müller, 2005). Daher eignet sich diese Rasse hauptsächlich als Vatterrasse zur Erzeugung von Masthybriden, da sie eine sehr gute Fleischigkeit bei mittleren täglichen Zunahmen vererbt (Weiß et al., 2011).



Abbildung 15: Piétrain-Jungeber, Foto: A.M.Scholz

2.3.2.3 Masthybriden

Die Anforderungen an die Mastschweine (hohe Tageszunahmen und gute Futterverwertung) und deren Schlachtkörperqualität können am besten durch Kreuzungszuchtmethoden und die Verpaarung von Vater- und Mutterrassen erreicht werden (Willam und Simianer, 2011). Es werden Tiere von zwei verschiedenen Rassen bzw. zwei verschiedenen Linien (auch zwei verschiedenen Kreuzungslinien) verpaart, um F1-Masthybriden zu erzeugen, mit denen nicht weiter gezüchtet wird. Die F1-Masthybriden zeichnen sich in der Regel durch positive Heterosiseffekte aus (Littmann et al., 2006).

2.3.2.4 Genetischer Einfluss auf die Klauen- und Gelenkgesundheit

Die Stellung der Gliedmaßen und die Fortbewegungsmerkmale sind unter anderem erblich bedingt, daher ist es möglich diese Merkmale durch Selektion zu verändern. Gute Exterieur- und Fortbewegungsmerkmale sind häufig mit

großen Würfeln und mit einem schnellen „wieder in Rausche kommen“ nach dem Absetzen assoziiert. Es sollte folglich möglich sein, die Zuchtschweine gleichzeitig auf Fundamentgesundheit und effiziente Reproduktionsleistung zu selektieren, um diese Merkmale züchterisch zu verbessern (Le et al., 2015).

Das Exterieur steht mit der Konstitution in Zusammenhang, wobei Konstitution die genetisch bedingte Fähigkeit eines Tieres in seiner Umwelt zurechtzukommen beschreibt. Veränderungen an Gliedmaßen und Klauen stellen einen großen Teil der fehlerhaften Konstitution dar (van Steenberghe, 1989). Die phänotypische Selektion aufgrund äußerer Merkmale kann zu einer Verbesserung der Langlebigkeit der Tiere führen. Deswegen sollten Jungsauen mit extremen Fuß- und Beinbefunden nicht für die Zucht verwendet werden (Tarrés et al., 2006).

Um den genetischen Einfluss von Beinschwäche beim Schwein zu untersuchen, wird versucht, die quantitativen Merkmalsgenorte (Quantitative Trait Loci = QTL) zu identifizieren, welche einen Einfluss auf die Fundamentgesundheit haben (Laenoi et al., 2011). Zur Genkartierung werden SNPs (single nucleotide polymorphisms) eingesetzt. Ein großer Teil der genetischen Variation, die durch die Assoziation mit SNPs erklärt wird, ist sehr vielversprechend für die markergestützte (genomische) Selektion gegen Osteochondrose (Christensen et al., 2010).

Beinschwäche und Osteochondrose sind bei Schweinen mit geringem bis mittleren Ausmaß vererbbar (Vorderbeine = Heritabilität $\rightarrow h^2 = 0,28 \pm 0,11$; Hinterbeine = $h^2 = 0,38 \pm 0,11$). Da es diese genetischen Faktoren in Bezug auf die Beinschwäche gibt, ist es möglich züchterisch eine Verbesserung der Beinstabilität und eine Verringerung der Osteochondrose zu erwarten (Fukawa und Kusuhara, 2001). Draper et al. (1992) haben das Auftreten von Beinschwäche bei verschiedenen Duroc-Linien untersucht. Einige Osteochondrose-Läsionen wurden im Gelenkknorpel im proximalen und distalen Bereich des Humerus und im proximalen Bereich von Radius und Ulna diagnostiziert. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Duroc-Linien in Bezug auf das Auftreten von Osteochondrose. Die schwersten

osteocondralen Läsionen wurden am distalen Humerus gefunden. Die geringsten Läsionen traten am proximalen Humerus auf (Draper et al., 1992).

Bei der Landrasse korreliert der Gesundheitsstatus des Fundaments mit der Nutzungsdauer. Eine gute Gesundheit des Fundaments trägt zu einer längeren Nutzungs- und somit Lebensdauer bei. Die Heritabilitäten (Erblichkeit = h^2) für die nicht linear definierten Gliedmaßen-Scores wurden für die Rassen Large White und Landrasse auf 13% geschätzt (López-Serrano et al., 2000).

Jørgensen und Andersen (2000) haben genetische Parameter für Osteochondrose und Beinschwäche bei Ebern der Rassen Yorkshire und Dänische Landrasse untersucht. Die Tiere der Dänischen Landrasse waren in Bezug auf Osteochondrose an allen untersuchten Regionen stärker betroffen als die Eber der Rasse Yorkshire. Die Heritabilitäten der durchschnittlichen Osteochondrose-Scores waren niedrig bis mäßig und reichten von 0,08 bis 0,39. Dies deutet darauf hin, dass alle Merkmale auf die Selektion ansprechen würden. Die Merkmale mit geringer Prävalenz (Talus, Humeruskondylen und diastale Tibia bei der Rasse Yorkshire) waren ebenfalls Merkmale mit geringen Heritabilitäten. Die Summe aller Merkmale zeigte eine Heritabilität von 0,38 für Dänische Landrasse und 0,16 für Yorkshire. Die Größe der genetischen Korrelationen zwischen Osteochondrose und Beinschwäche ist ein Indikator, ob eine direkte Selektion gegen Osteochondrose erforderlich ist, um die Prävalenz dieser Erkrankung zu reduzieren. Das Auftreten von Osteochondrose in den Humerus- und Femurkondylen sind die wichtigsten Untersuchungsmerkmale, um die Fundamentgesundheit, insbesondere von der Rasse Yorkshire, zu verbessern. Die höchste Prävalenz von Osteochondrose wurde in den Femurkondylen festgestellt. Die Heritabilität von diesem Merkmal beträgt 0,32 bei der Rasse Yorkshire und 0,31 bei der Dänischen Landrasse. Somit kann dieses Merkmal durch Selektion verbessert werden (Jørgensen und Andersen, 2000).

Es findet sich kein Effekt des Geschlechts auf Beinschwäche bezogene Merkmale bei Duroc x Piétrain Kreuzungen. Das QTL-Allel, welches für die Ausprägung von Osteochondrose verantwortlich ist, stammt sowohl von der Rasse Duroc als auch von der Rasse Piétrain. Bei Duroc x Piétrain-

Kreuzungstieren sind die Vorderbeine weniger anfällig für Osteochondrose als die Hinterbeine. Die Ausprägung von Merkmalen der Füße und Gliedmaßen werden durch mehrere Gene kontrolliert (Laenoi et al., 2011).

Mittels Computertomographie (CT) wurden moderate Heritabilitäten für Osteochondrose bei Landrasse-Schweinen bestimmt (Aasmundstad et al., 2013). Außerdem bestehen moderate genetische Korrelationen zwischen schnellem Wachstum im frühen Alter und der Summe der mittels CT beurteilten Osteochondrose-Scores (Beurteilung mediale und laterale Kondylen am distalen Ende des Humerus sowie des Femur des rechten und linken Beines). Die Summe der Osteochondrose-Scores weist die höchsten Heritabilitäten auf ($h^2 = 0,31$, s.e. = 0,09) im Vergleich zu den Scores der einzelnen Untersuchungsregionen. Da Osteochondrose eine der Hauptursachen für Lahmheit ist, könnte eine Selektion gegen Osteochondrose die Inzidenz des vorzeitigen Abgangs von Zuchtsauen reduzieren. Dieses Merkmal ist besonders wichtig in Linien der Mutterrassen, wo die Langlebigkeit der Sauen von großer Bedeutung ist. Wenn ein Zuchtprogramm auf schnelles Wachstum der Schweine abzielt, könnte die Eigenschaft des Osteochondrose-Scores in das Zuchtziel aufgenommen werden, um die Entwicklung von Osteochondrose zu kontrollieren oder sogar zu senken. Die Zunahme des Auftretens von Osteochondrose könnte sogar vermieden werden, indem in der Schweinezucht weniger auf schnelles Wachstum selektiert wird. Durch einen Rückgang der Osteochondrose kann auch das Auftreten von Lahmheiten beim Mastschwein verringert werden (Aasmundstad et al., 2013).

Es besteht eine geringe Korrelation zwischen Fundamentmerkmalen des Exterieurs und durch CT diagnostizierte Osteochondrose-Läsionen. Das Merkmal Osteochondrose zeigte eine Heritabilität von 0,29 bei der Untersuchung von 4571 Norsvin Landrasse-Ebern (Aasmundstad et al., 2014).

2.3.3 Fütterung

Futterergänzungsmittel können zu einer Verbesserung der Klauenhornqualität beitragen. Dagegen führt eine mangelhafte Ernährung zu molekularen Störungen des Hornwachstums (Deen et al., 2010).

Biotin ist notwendig für die Aufrechterhaltung der Klauengesundheit. Ein Mangel an Biotin kann zu Lahmheit und Hornrissen in der Wand und Sohle der Klauen führen (Jackson und Cockcroft, 2007), daher hat die Supplementierung von Biotin einen positiven Einfluss (Lewis und Southern, 2001).

Kupfer, Schwefel und Zink übernehmen wichtige Funktionen in der Keratin-Bildung (Deen et al., 2010; Dryden, 2008). Keratin ist ein spezialisiertes Protein, das harte und weiche (keratinisierte) Gewebe bildet (Deen et al., 2010). Durch eine Verbesserung der Zinkversorgung können ebenfalls Klauenhornrisse und andere Klauenläsionen reduziert werden.

Mangan wird zur Verbesserung der Knochendichte und Gelenkgesundheit benötigt - insbesondere bei der Knorpelentwicklung und –stärke (Deen et al., 2010), da es eine kritische Rolle in der Abordnung der organischen Matrix im Knochen hat (Lewis und Southern, 2001).

Selen hat eine wichtige Funktion im Muskelstoffwechsel (Dryden, 2008); aber eine übermäßige Selenaufnahme kann zu ungesundem Klauenhorngewebe und Lahmheiten führen (Deen et al., 2010).

Calcium und Phosphor sind die wesentlichen Bestandteile vom Knochenmineral (Dryden, 2008) und bedeutend für das Wachstum und die Erhaltung der Skelettstabilität (Deen et al. 2010). Knochen ist der Hauptspeicher von Calcium und Phosphor im Körper (Dryden, 2008). Das Calcium-Phosphor-Verhältnis in der Schweineregeneration sollte 1,2:1 bis 2:1 betragen (Deen et al., 2010).

Magnesium ist wichtig für die Stärke und Integrität von Knochen und stellt das dritt-häufigste Mineral im Knochen dar (Lewis und Southern, 2001). Es beeinflusst die Größe der Apatitkristalle und damit die Bruchigkeit des Knochens. Große Kristalle führen zu einer dichteren, aber empfindlicheren Knochenstruktur (Dryden, 2008).

Sowohl eine Unterversorgung als auch Überversorgung von Vitamin A kann zu einem abnormalen Knochenumbau führen. Zusätzlich kann ein Mangel an Vitamin A eine Entzündung des Kronsauums der Klaue zur Folge haben. Vitamin C besitzt eine wichtige Rolle bei der Bindegewebsproduktion (z.B. für Blutgefäßwände, Knochengerüst, Sehnen, Bänder und Knorpel). Vitamin D ist

essentiell bei der Kontrolle des Calciumstoffwechsels. Bei einem Vitamin D-Mangel wird Calcium aus dem Knochen entfernt und sie werden weich und spröde (Deen et al., 2010).

Die Mineralien Kupfer, Mangan und Silicium verhindern den Abbau der Knorpelmatrix und verbessern die Reparaturfähigkeit eines Gewebes insbesondere des Gelenk-Epiphysenknorpels. Die Gabe von hohen Mengen an Methionin, Threonin, Prolin und Glycin beeinflusst den Knorpelstoffwechsel positiv (Frantz et al., 2008). Besonders ein Mangel von Calcium, Phosphor, Kupfer und Zink sowie Überfütterung und Überbelastung können zu einer Osteochondrose beitragen (Dryden, 2008).

Auch die Fütterungsstrategie hat einen Einfluss auf das Vorkommen von Erkrankungen des Bewegungsapparates. *Ad-libitum* gefütterte Schweine sind signifikant häufiger von Osteochondrose in den Tarsalgelenken (= Sprunggelenke) im Vergleich zu rationiert gefütterten Schweinen betroffen. Außerdem weisen *ad-libitum* gefütterte Mastschweine, unabhängig vom Haltungssystem, ein höheres Schlachtgewicht auf. Das höhere muskuläre Wachstum in Relation zu ihrer Skelettentwicklung führt zu einer unausgeglichene Entwicklung. Die Prävalenz von Osteochondrose betrug bei Tieren auf Vollspaltenboden mit *ad-libitum* Fütterung 57,5 %. Die Prävalenz lässt sich auf 33,7 % senken, wenn die Schweine auf Tiefstreu mit mehr Platz und restriktiver Fütterung gehalten werden (van Grevenhof et al., 2011). Ebenso führt das Auftreten einer Adipositas zu einer erhöhten Belastung des Skelettsystems (Wiesemüller und Bolduan, 1993).

2.3.4 Geschlecht

Das Geschlecht beeinflusst das Auftreten von Osteochondrose. Eber sind häufiger betroffen als Jungsauen (van Grevenhof et al., 2011). Die Prävalenz von Osteochondrose auf der lateralen Seite des Ellbogengelenks ist bei Jungsauen wiederum höher ($p < 0,05$) als bei Kastraten. Kastraten zeigen eine höhere Prävalenz von Osteochondrose im medialen und lateralen distalen Talus. Das Geschlecht zeigte keine signifikanten Unterschiede *Osteochondrose dissecans* betreffend in anderen Lokalisationen (Etterlin et al., 2014).

Zwischen männlich kastrierten Tieren und Sauen konnten von Winkler (2017) keine signifikanten Unterschiede im Knorpelvolumen, Knochenmineraldichte und Knochenmineralgehalt festgestellt werden, wobei männlich kastrierte Tiere ($111,6 \pm 1,7$ kg) am Ende der Mast ein signifikant ($p = 0,0016$) höheres Gewicht als die weiblichen Tiere ($104,0 \pm 1,5$ kg) aufwiesen (Winkler, 2017). Böttinger (2006) beobachtete ebenfalls eine signifikant größere durchschnittliche tägliche Zunahme bei männlich kastrierten Schweinen. Dagegen zeigten bei Pappenberger (2014) die Sauen einen signifikant höheren Knochenmineralgehalt als männlich kastrierte Schweine. Aber es bestehen Unterschiede im Körperbau zwischen kastrierten Ebern und Jungsauen. Kastrierte Eber weisen einen höheren Muskel-Score auf und besitzen mehr Fettgewebe als Jungsauen (Winn et al., 2015). In Untersuchungen mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie weisen männlich kastrierte Schweine weniger Muskelgewebe und mehr Fettgewebe auf als Sauen (Böttinger 2006; Pappenberger 2014).

2.3.5 Gruppengefüge

Lahmheit kommt häufiger in der Gruppenhaltung von Sauen vor (Chapinal et al., 2010) und kann durch Rankkämpfe und das Umstallen von Schweinen in ein neues Gruppengefüge bedingt sein (Ziron, 2014).

Olsson et al. (2016) haben ein experimentelles Modell untersucht, welches den Einfluss des Gruppengefüges auf die Klauengesundheit bei wachsenden weiblichen Schweinen evaluiert. Es wurden traumatische Klauenläsionen bei Jungsauen durch steigende soziale und agonistische Aktivität provoziert, welche durch Umgruppierung gefördert wurde (Olsson et al., 2016). Agonistisch beschreibt ein kämpferisches Verhalten (Duden, die deutsche Rechtschreibung, 2009). Die Tiere wurden in zwei Gruppen eingeteilt. In der einen Gruppe fand keine Umgruppierung statt, und die Jungsauen zeigten eine normale Aktivität. In der anderen Gruppe wurden wiederholt Umgruppierungen durchgeführt, wobei eine steigende Aktivität in der Gruppe beobachtet wurde. Insgesamt wurden zufällig 72 Jungsauen (Paare von Wurfgeschwistern) in zwei Durchgängen mit einem Alter von 4 Monaten untersucht. Mit einem Alter von 8, 9 und 10 Monaten wurden die Hälfte der Jungsauen (Anzahl = 36) miteinander

umgruppiert. Im Alter von 11 Monaten wurden alle Jungsauen in beiden Gruppen geschlachtet und der linke hintere Fuß wurde zur Untersuchung entfernt. Läsionen der Ferse, am Übergang Ferse/ Sohle, der weißen Linie, der Wand und die Überlänge der Ferse wurden an der äußeren und inneren Klaue beurteilt. Die Klauenläsionen wurden „blind“ gescort mit einer Skala von 0 bis 3. Die Ergebnisse zeigen Klauenläsionen am weichen und harten Horn der Klaue und signifikant ($p=0,004$) höhere Klauenläsionen-Scores bei den wiederholt umgruppierten Jungsauen als bei den nicht umgruppierten Jungsauen. Umgruppierte Jungsauen wiesen sowohl mehr als auch schwerere Klauenläsionen auf als nicht umgruppierte Jungsauen (Olsson et al., 2016).

2.3.6 „Tierwohl“ und Verhalten

„Tierwohl“ ist eine Eigenschaft eines Tieres und darf nicht von den Bedürfnissen des Menschen ausgehen. Das Wohl eines Individuums ist sein Zustand in Bezug auf seine Versuche mit seiner Umwelt zurechtzukommen. Dieser Zustand beinhaltet, wie viel es tun muss, um mit seiner Umwelt fertig zu werden, wie weit es in seiner Umwelt erfolgreich ist oder nicht und die damit verbundenen Gefühle. Das Wohlergehen kann von sehr gut bis sehr schlecht variieren. Studien über „Tierwohl“ sind am effektivsten, wenn eine Vielzahl von Parametern gemessen wird. Es ist wichtig Studien über „Tierwohl“ objektiv zu vergleichen, da in den einzelnen Untersuchungen verschiedene Situationen evaluiert werden. Die Beurteilung von „Tierwohl“ sollte getrennt von der ethischen Beurteilung der Art und Weise geschehen, wie Tiere behandelt werden sollten. Außerdem sollte „Tierwohl“ so definiert sein, dass es leicht mit anderen Konzepten (Bedürfnisse, Freiheiten, Glück, Bewältigung, Kontrolle, Vorhersagbarkeit, Gefühle, Leiden, Schmerz, Angst, Langeweile, Stress und Gesundheit) in Verbindung gebracht werden kann. Krankheit, Verletzung, Bewegungsschwierigkeiten und Wachstumsstörungen weisen auf ein schlechtes Wohlbefinden hin (Broom, 1996).

Nach einer Definition von Webster (2001) ist das Wohlergehen eines Nutztieres gut, wenn es gesund und frei von Leiden ist. Es ist wichtig, dass die Wahrnehmung des Tierwohls aus Sicht des Menschen die gleiche ist, wie für die Tiere selbst. Das Prinzip der „Fünf Freiheiten“ eignet sich sehr gut um die

Stärken und Schwächen eines Haltungssystems in Bezug auf das „Tierwohl“ zu bewerten (Webster, 2001). Eine Übersicht über die „Fünf Freiheiten der Tiere“ wird in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Die fünf Freiheiten der Tiere aus Webster (2001)

Freiheit	Erklärung
1. Freiheit von Hunger, Durst und Fehlernährung	Durch Zugang zu frischem Wasser und einer Ernährung, die die Gesundheit und Vitalität der Tiere erhält
2. Freiheit von Unbehagen	Durch die Bereitstellung einer geeigneten Haltungsumwelt, einschließlich eines Unterstandes und eines bequemen Liegeplatzes
3. Freiheit von Schmerz, Verletzung und Krankheit	Durch Vorbeugung oder schnelle Diagnose und Behandlung
4. Freiheit zum Ausleben normalen Verhaltens	Durch Bereitstellung von ausreichend Platz, angemessener Ausstattung und Gesellschaft durch Tiere der eigenen Art
5. Freiheit von Angst und Stress	Indem Bedingungen geschaffen werden, die mentales Leiden vermeiden

Lahmheit ist weit verbreitet, führt zu einem Tierwohl-Problem (Main et al., 2000; Nalon et al., 2014) und beeinträchtigt das Wohlergehen der Schweine durch die eingeschränkte Fähigkeit zur Fortbewegung, Schmerzen, allgemeines Unwohlsein und das Zeigen von krankheitsassoziierten Symptomen. Die Untersuchung von „Tierwohl“ besteht in der Messung von tierinduzierten Indikatoren. Das lange Liegen lahmer Sauen kann z.B. urogenitale Infektionen zur Folge haben und prädisponierend für weitere sekundäre Infektionen sein. Außerdem wird Lahmheit mit der Fertilität assoziiert (Heinonen et al., 2013).

Aus Sicht des Tierschutzes ist der wichtigste Aspekt die Evaluation der Schmerzen in Bezug zur Lahmheit, da Klauenläsionen und Lahmheit meistens mit Schmerzen einhergehen. Das Ziel aus Sicht der „Tierwohl“-Zertifizierung und Bewertung ist die Entwicklung von Stichproben-Strategien, welche eine korrekte Identifizierung eines Herdenproblems erlauben. Auch die Verfügbarkeit und Verbreitung von präzisen Indikatoren der relativen Schmerzhaftigkeit verschiedener Bedingungen, die zur Lahmheit führen, sind aus Gründen des Tierschutzes wichtig. Geringgradige Lahmheitserscheinungen führen dazu, dass viele Fälle oft unbehandelt bleiben oder zu spät behandelt werden und

somit das Wohl der Tiere gefährden (Nalon et al., 2013). Auch die Qualität des Bodens ist essentiell für das „Tierwohl“ (Zoric et al., 2008). Durch Erkrankungen am Fundament kommt es zu Verhaltenseinschränkungen in allen Verhaltensbereichen (Sozial-, Fress-, Fortpflanzungs-, Komfort-, Liege- und Defäkationsverhalten). Ranghohe Schweine verlieren schnell durch Lahmheit ihre Stellung in der Herde und steigen in der Rangordnung ab. Bei lahmen Schweinen tritt häufig eine Gewichtsabnahme auf, weil die betroffenen Tiere seltener fressen. Beim Ablegen lassen sich lahme Schweine häufig fallen, was zu weiteren Verletzungen führen kann. Auch Afterklauenabrisse beeinflussen das Laufverhalten massiv (Ziron, 2014).

Sauen mit verlängerten Klauen haben einen höheren Score für Erosionen an den Hintergliedmaßen ($p < 0,05$) und Korkenzieher-Klauen ($p < 0,05$) während des Abferkelns. In der ersten Woche nach dem Abferkeln verbringen Sauen mit überlangen Klauen weniger Zeit mit Fressen ($p < 0,05$), rutschen auf dem Boden ($p < 0,05$) und verlagern ihr Gewicht ($p < 0,05$) zwischen ihren Hinterbeinen häufiger als Sauen mit physiologisch langen Klauen. Sauen mit überlangen Klauen benötigen mehr Aufstehversuche zum Fressen ($p < 0,05$) und haben eine kürzere Latenzzeit zum Hinlegen ($p < 0,01$) nach dem Fressen. Überlange Klauen an den Hintergliedmaßen werden assoziiert mit steigenden Scores für andere Klauenveränderungen und mit vermehrtem „Rutschen“ im Abferkelsystem. Dieses Merkmal kann somit negative Auswirkungen auf das Wohl der Sauen und die Ferkelsterblichkeit haben (Calderón Díaz et al., 2015).

Sauen mit Lahmheit zeigen ein passives Verhalten. Sie liegen mehr, stehen und erforschen ihre Umwelt weniger. Lahmheit reduziert somit die Aktivität und hat einen Einfluss auf den Rang des Schweines in der Bucht. Veränderungen im Verhalten können als Zeichen von Schmerz beurteilt werden. Die Verbesserung der Lahmheitssymptome geht in der Regel mit einer Normalisierung des Verhaltens einher (Ala-Kurikka et al., 2017).

Die Überwachung von Verhaltensänderungen ist ein nützliches Werkzeug, um Krankheiten wie Lahmheit zu erkennen. Die Verhaltensweisen können beobachtet und anhand mehrerer Stichproben – und Aufzeichnungsmethoden bewertet werden. Die kontinuierliche Stichprobenmethode zeigt das genaueste

Verhaltensrepertoire eines Individuums, aber es handelt sich um eine arbeitsintensive und zeitaufwendige Methode (Whalin et al., 2016).

2.3.7 Klauenpflege

Klauenpflege hat einen positiven Effekt auf die Klauen- und Gelenksgesundheit beim Schwein. Nach der Klauenpflege zeigen die Schweine eine vermehrte Vorwärtsbewegung, die auf eine erhöhte Effizienz des Gehens hindeutet. Die kürzere Schrittdauer, die nach der Klauenpflege beobachtet wird, ist auf eine kürzere Zeit in der Stand- und Schwungphase des Schrittes zurückzuführen. Durch das Kürzen der Klauenlänge wird die Langzeitbelastung der Gelenke und Bänder verringert. Die Verbesserung des Gangbildes nach der Klauenpflege könnte zu einer Abnahme von Verletzungen und Lahmheit führen (Tinkle et al., 2017).

2.4 Magnetresonanztomographie (MRT)

2.4.1 Technisches Prinzip

Das Prinzip der Magnetresonanztomographie (MRT) basiert auf der Nettomagnetisierung von Protonen im Magnetfeld. Protonen besitzen einen Kernspin und senden zeitabhängige Signale, nachdem sie durch Radiofrequenzwellen eine Energiezufuhr erhalten haben. Daraus entstehen Spannungsausschläge, woraus wiederum 2D-Bild-Serien angefertigt werden können. Diese 2D-Bildserien enthalten tatsächlich dreidimensionale Informationen zur Körper- und Gewebezusammensetzung (Scholz et al., 2016).

Protonen stellen MR-aktive Kerne dar und kommen z.B. in Form von Wasserstoffatomkernen im gesamten Körper vor. Protonen weisen die Kernladungszahl 1 und eine ungerade Anzahl an Nukleonen auf (Jackson et al., 2009). Diese besitzen eine sich ständig bewegende positive elektrische Ladung, die sich als Eigenspin (Präzession wie Kreisel Spitze = Drehbewegung) jedes Protons nachweisen lässt. Ein elektrischer Strom, welcher durch die sich bewegende Ladung entsteht, induziert ein Magnetfeld. Die Folge davon ist, dass jedes Proton ein eigenes Magnetfeld aufweist, welches sich wie ein Stabmagnet verhält (Schild, 1997).

Der Körper verfügt über mehrere Millionen Protonen mit Kernspin, welche Magneteigenschaften aufweisen. Im Normalzustand ist die Protonenanordnung zufällig und beide Magnetfelder (inneres und äußeres Magnetfeld) heben sich gegenseitig auf. Während der Untersuchung im Magnetresonanztomographen findet eine Ausrichtung aller Protonen nach dem äußerem Magnetfeld statt (Jackson et al., 2009). Die Protonen können sich entweder parallel oder antiparallel im externen Magnetfeld ausrichten. Protonen führen eine Präzessionsbewegung entlang der Feldlinien des Magneten aus. Je stärker das Magnetfeld ist, desto höher ist die Präzessionsfrequenz. Dieser Sachverhalt wird in der Larmor-Gleichung dargestellt (Schild, 1997):

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

ω_0 = Präzessionsfrequenz in Hertz oder Megahertz; γ = gyromagnetisches Verhältnis; B_0 = Stärke des externen Magnetfeldes in Tesla

Die benötigte Radiofrequenz wird durch die Magnetfeldstärke (B) vorgegeben, weil die Resonanzfrequenz (Präzessionswinkelgeschwindigkeit) vom gyromagnetischen Verhältnis (γ , MHz/Tesla) abgeleitet werden kann. Die gewünschten Atomkerne können nur durch solche Radiowellen mit der exakt entsprechenden Resonanzfrequenz (Präzessionswinkelgeschwindigkeit) angeregt werden. Durch die dabei zugeführte Energie (Radio-Hochfrequenzimpuls) ändern die Atomkerne ihre vorgegebene Richtung im festen Magnetfeld B_0 (z-Achse) in xy-Richtung (Scholz et al., 2016).

Der Hochfrequenzimpuls (HF-Impuls = Radiowelle) wird durch eine Spule zugeführt (Jackson et al., 2009). Nach dem Ausschalten dieses Hochfrequenzimpulses kehren die Atomkerne in ihren Ursprungszustand zurück. Dabei geben die Atomkerne Energie ab, welche als elektromagnetische Spannung gemessen werden kann (Scholz et al., 2016). Durch den Hochfrequenzimpuls nehmen die Protonen Energie auf und gelangen somit auf ein höheres Energieniveau. Es kommt zu einer Addition der Magnetvektoren quer zum äußeren Magnetfeld. Somit entsteht eine Transversalmagnetisierung und die Longitudinalmagnetisierung nimmt ab. Nach der Abschaltung des HF-Impulses kommt es wieder zu einer Zunahme der Longitudinalmagnetisierung. Dies wird als longitudinale Relaxation bezeichnet und durch die Zeitkonstante T_1 charakterisiert. Bei der transversalen Relaxation kommt es zu einer Abnahme der transversalen Magnetisierung und anschließend zu einem kompletten Verschwinden. Die transversale Relaxation ist durch die Zeitkonstante T_2 gekennzeichnet (Schild, 1997).

Die T_2 (auch Querrelaxationszeit) ist abhängig von der Wechselwirkung der Protonen untereinander und die T_1 (auch Längsrelaxationszeit) basiert auf der Spin-Gitter-Wechselwirkung (Scholz et al. 2016).

In der Magnetresonanztomographie kann zwischen drei Wichtungen der MR-Bilder unterschieden werden: T_1 -Wichtung (Längsrelaxation), T_2 -Wichtung (Querrelaxation) und Protonen-Wichtung (Jackson et al., 2009). Eine Übersicht über diese Wichtungen ist in der nachfolgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Wichtungen nach Jackson et al. (2009)

	T1-Wichtung	T2-Wichtung	Protonen-Wichtung
TR	Kurz (<500ms)	Lang (>1500ms)	Lang (>1500ms)
TE	Kurz (<50ms)	Lang (>80ms)	Kurz (<50ms)
Verwendung	Beurteilung anatomischer Strukturen	Identifizierung pathologischer Prozesse (z.B. Ödeme)	
Fettgewebe	Hell	Hell (aber weniger als bei T1)	Hell
Wasser	Dunkel	Hell	Dunkel
Graue Substanz	Grau	Grau	Grau
Weiß Substanz	Weiß	Dunkel	Dunkel

T1-Zeit ist länger als die T2-Zeit und verlängert sich mit zunehmender Feldstärke. Wasser besitzt eine längere T2-Zeit als Flüssigkeiten mit größeren Molekülen. Bei einer Spin-Echo-Sequenz wird häufig ein 90°- und ein anschließender 180°-Impuls benutzt. Durch externe und interne Inhomogenitäten des Magnetfeldes geraten die Protonen nach dem 90°-Impuls außer Phase. Durch den 180°-Impuls bewegen sich die Protonen wieder in Phase und es entsteht ein starkes Signal (= Spin-Echo). Außerdem entfernt der 180°-Impuls Inhomogenitäten des Magnetfeldes. Aufgrund von internen T2-Effekten bei mehreren 180°-Impulsen entsteht eine Abschwächung des Signals zwischen zwei aufeinanderfolgenden Echos (Schild, 1997).

Durch die gewebsspezifischen, unterschiedlich langen Relaxationszeiten (T1 und T2) und Protonendichte können die verschiedenen Gewebe differenziert werden (Scholz et al. 2016), die auf Unterschieden im Bildkontrast zwischen den einzelnen Geweben beruhen (Jackson et al., 2009).

Die Repetitions-Time (=TR) wird definiert als Zeit zwischen den Anregungen durch Radiofrequenzimpulse (Scholz et al., 2016). Es handelt sich somit um die Zeit zwischen zwei HF-Impulsen (Jackson et al., 2009). Eine TR von < 500ms wird als kurz und eine TR von >1500ms wird als lang angesehen. Bei einer kurzen TR entsteht ein T1-gewichtetes Bild. Bei einer langen TR entsteht ein T2-gewichtetes Bild (Schild, 1997).

Die Echo-Time (= TE) wird definiert als Zeit zwischen den Echos, also die Zeit zwischen den Maxima des Signalempfangs während des freien Induktionsabfall (Scholz et al., 2016). Die TEs (= Zeit nach dem 90°-Impuls) können verschieden gewählt werden, dadurch ist es möglich die Signale unterschiedlich „T2“ oder „T1“ zu wichten. Ist die TE sehr kurz, sind die T2-Effekte noch nicht bemerkbar. Der Unterschied der Signalstärke zwischen verschiedenen Geweben bei längerer TE ist bedingt von ihrer jeweiligen T2 (= transversale Relaxationszeit) (Schild, 1997).

Gradientenspulen (= weitere lokale Magnetfelder) dienen der räumlichen Zuordnung einzelner Atomkerne oder „Atomkerncluster“ in einem Objekt (Gruppe von Voxel) (Scholz et al., 2016), indem sie von den Protonen ausgesendete Signale detektieren und die x-, y- und z- Koordinaten festlegen (Jackson et al., 2009). Die Gradientenspulen beschleunigen die Protonen im dreidimensionalen Raum unterschiedlich schnell bzw. versetzen sie phasenverschieden in die Präzessionsbewegung. Nach einer Fourier-Analyse entstehen ein bzw. mehrere Schichtbilder (in z-Richtung) mit örtlich (in xy-Richtung) aufgelösten Signalintensitäten (Scholz et al. 2016), wodurch die Interpretation der Gesamtheit der Signale einer Schicht mit verschiedenen Phasen und Frequenzen ermöglicht wird (Schild, 1997).

Es gibt verschiedene Bildgebungssequenzen, welche durch die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Hochfrequenzimpulsen und Zeitpunkten der Signalauslesung zustande kommen (Jackson et al., 2009). Es gibt eine Vielzahl von Impulsabfolgen und somit eine Vielzahl von Sequenzen (Schild, 1997):

- Partial-Saturation-Sequenz (T1-Wichtung)
- Saturation-Recovery-Sequenz (Protonenwichtung)
- Inversion-Recovery-Sequenz (T1-Wichtung)
- Spin-Echo-Sequenz (Protonendichte-, T1- und T2-Wichtung, je nach Länge der gewählten TR und TE).

Durch die Überlagerung des externen Magnetfeldes mit einem Gradientenfeld kann die gewünschte zu untersuchende Schicht ausgewählt werden. Die

Protonen dieses Gradientenfeldes zeigen unterschiedliche Präzessionsfrequenzen, da verschiedene Magnetfeldstärken auf sie einwirken. Eine Änderung der Schichtdicke kann entweder durch die Veränderung der Bandbreite des HF-Impulses oder durch Veränderung der Steilheit des Gradientenfeldes hervorgerufen werden. Der Frequenzkodier- und der Phasenkodiergradient dienen der Bestimmung eines speziellen Punktes in der Schicht, von dem ein bestimmtes Signal ausgeht. Nach der Abschaltung des Phasenkodiergradienten gelangen alle Protonen zu einer gleichen Präzessionsfrequenz zurück (Phasenkodierungsfrequenz). Durch den Phasenkodierungsgradienten sind die Protonen außer Phase und dieses Phänomen lässt sich erfassen (Schild, 1997).

Die Methode der MRT kann durch den Einsatz der verschiedenen Sequenz-Wichtungen (T1- oder T2- gewichtete Sequenzen) für die Untersuchung von muskuloskelettalen Forschungsschwerpunkten verwendet werden und eignet sich auch für die *In-vivo*-Phänotypisierung (Scholz et al., 2016).

In Abbildung 16 ist die Bewegung eines Protons im Magnetfeld skizziert.

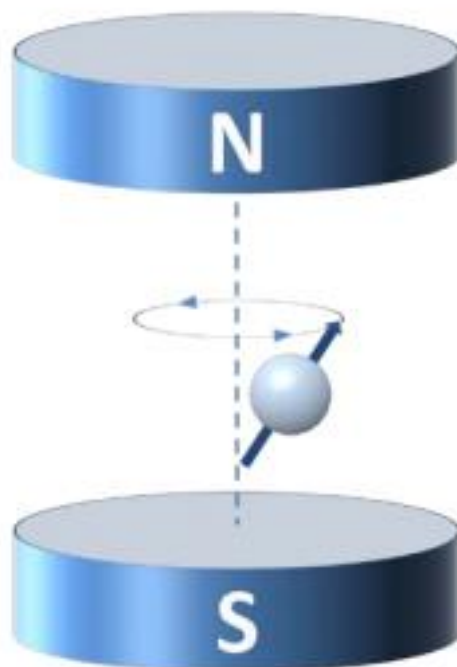


Abbildung 16: Protonenbewegung im Magnetfeld, aus Bernau (2011), modifiziert nach Schild (1990)

2.4.2 Vorteile der Untersuchung mittels MRT

Die Vorteile der Untersuchung mittels MRT stellen die sehr gute Weichgewebedifferenzierung, die multiplanare Darstellung (3D) und die funktionelle Bildgebung dar. Außerdem entsteht für den Patienten keine Strahlenbelastung (Scholz et al., 2016). Es handelt sich um ein nicht invasives Verfahren und diese Methode erlaubt es, Bilder mit sehr guter Auflösung in fast allen Ebenen anzufertigen (Jackson et al., 2009). Die Methode der Magnetresonanztomographie ist ebenso sehr gut für die Untersuchung von Gelenken (wie z.B. dem Kniegelenk) geeignet. MR-Bilder ermöglichen die Bewertung aller Gelenkstrukturen, einschließlich der Menisken, Synovia-Gewebe, Bänder und speziell Knorpel (Maataoui et al., 2010).

2.4.3 Nachteile der Untersuchung mittels MRT

Nachteilig bei einer Untersuchung mit Hilfe der Magnetresonanztomographie sind der hohe technische Aufwand, die relativ hohen Investitionskosten, die eingeschränkte Verfügbarkeit und die aufwendige Bildauswertung. Außerdem sind die Dichten von Fett-, Muskelgewebe sowie Organen variabel (Scholz et al., 2016). Eine Untersuchung bei Patienten mit magnetischen Fremdkörpern oder Implantaten aus Metall ist nicht möglich, da sich diese durch das Magnetfeld wie metallische Projektile verhalten. Die HF-Spulen erzeugen laute Vibrationsgeräusche. Daher sollte jeder Patient einen Gehörschutz tragen. Außerdem können eine Reihe von Artefakten auftreten, welche in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengefasst sind.

Tabelle 3: Übersicht Artefakte

Bezeichnung	Ursache	Darstellung im MR-Bild
Suszeptibilitätsartefakte	Metallische Gegenstände führen zu einer Ablenkung und Verzerrung des Magnetfeldes	Veränderte bzw. schwarze Darstellung im MR-Bild
Bewegungsartefakte	Atmung, Herzschläge und sonstige Bewegungen	Unscharfe Bilder
Hochfrequenzartefakte	Interferenz mit äußeren Radiofrequenzen (Reduktion durch Unterbringung des MRT-Gerätes in einem Faraday'schen Käfig)	
Chemische Verschiebung an den Übergängen zwischen Wasser und Fettgewebe	Verschiedene Relaxation der Protonen im Wasser und im Fettgewebe	Dunkle Linie an der Gewebegrenze
Trunkationsartefakte (auch Verstümmelungsartefakte oder Gibbsartefakte)	Vorkommen an Strukturen, die kontrastreich sind	Parallele Streifen

Die Methode der MRT eignet sich weniger gut zur Untersuchung von kortikalem Knochen, da dieser wenig Wasser enthält und sich daher dunkel darstellt. Die MRT-Untersuchung dauert länger als eine CT-Untersuchung und eignet sich nur bedingt bei schwer erkrankten Notfallpatienten, da alle Geräte zur Überwachung der Vitalparameter eine MRT-Kompatibilität aufweisen müssen (Jackson et al., 2009).

2.4.4 Einsatz der MRT in der Humanmedizin

In der Humanmedizin fand die Durchführung der ersten MRT-Untersuchung am Menschen am 3. Juli 1977 statt. Es wurden ungefähr 5 Stunden benötigt, um ein MRT-Bild zu erzeugen. Die Methode der MRT findet in der Humanmedizin seitdem vielfältige Anwendung (Jackson et al., 2009). Sie spielt eine große Rolle bei der Beurteilung und Charakterisierung von Tumoren und tumorähnlichen Läsionen (Larbi et al., 2016), u.a. für Meningeome, Hypophysenadenome, Liposarkome (Jackson et al., 2009). Durch die Untersuchung mittels MRT können diese Veränderungen lokalisiert werden. Anschließend kann beurteilt werden, welche anatomischen Strukturen betroffen

sind. Somit ist diese Untersuchung sehr hilfreich, um Läsionen basierend auf ihren Komponenten (wie Fett, Knorpel und Hämosiderin) zu charakterisieren (Larbi et al., 2016).

2.4.5 Einsatz der MRT zur Untersuchung von Knorpelgewebe beim Menschen

In diesem Kapitel soll ein Überblick über humanmedizinische Untersuchungen von Knorpelgeweben mittels MRT gegeben werden.

Maataoui et al. (2010) haben quantitative Knorpelvolumenmessungen unter Benutzung verschiedener Schichtdicken durchgeführt. Das Knorpelvolumen des medialen und lateralen Tibia-Plateaus wurde gemessen durch zwei unabhängige Betrachter in 1,5mm, 3,0mm und 5,0 mm Schnitten. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Knorpelvolumen-Messungen beobachtet ($p > 0,05$). Die Knorpelvolumenmessung unter Nutzung der Schichtdicke von 1,5 mm liefert keine größere Genauigkeit, als eine Knorpelvolumenmessung in 5 mm Schnitten, während insgesamt bis zu 70% Zeitersparnis möglich ist (Maataoui et al., 2010).

Keenan et al. (2011) haben Assoziationen zwischen dem Glykosaminoglykangehalt und der T1-Relaxationszeit bei einer normalen T2-Relaxationszeit untersucht. In dieser Studie korrelierte die T1-Relaxationszeit mit dem Glykosaminoglykangehalt. Der Glykosaminoglykangehalt verringert sich signifikant mit fortgeschrittenen Alter (Keenan et al., 2011).

Wang et al. (2015) haben Assoziationen von Knochenmarkläsionen mit Schmerzen im Knie, Knorpeldefekten und Knorpelvolumen bei älteren Menschen untersucht. Die Prävalenz der patellaren Knochenmarkläsionen betrug 19%. Patellare Knochenmarksläsionen waren assoziiert mit verstärkten Schmerzen in den Knien, vermehrten Aufkommen von Knorpeldefekten an der Patella und einem abnehmenden patellaren Knorpelvolumen (Wang et al., 2015).

Schmitz et al. (2017) haben die Knorpeldicken am medialen Femurkondylus mit Ultraschall und MRT (3 T) gemessen und verglichen. Bei den Ultraschallmessungen zeigten die Frauen eine verringerte Knorpeldicke im

Vergleich zu den Männern ($p \leq 0,05$). Die transversalen Ultraschall-Knorpeldickenmessungen korrelierten signifikant positiv mit den mittleren ($r = 0,6$, $p \leq 0,05$) und posterioren ($r = 0,49$, $p \leq 0,05$) MRT-Messungen (Schmitz et al., 2017).

Giannicola et al. (2017) haben die Knorpeldicke am distalen *Humerus* untersucht. Ein signifikanter Unterschied wurde in den mittleren Knorpeldicken zwischen den untersuchten Punkten in der coronaren und axialen Ebene beobachtet. Es traten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Körperseite oder das Geschlecht auf. Die Knorpelschicht des distalen *Humerus* ist nicht einheitlich und beeinflusst die Form der Gelenkfläche. Die Knorpelschicht scheint an den lateralen und medialen Rändern dünner und in der zentralen Gelenkzone dicker zu sein (Giannicola et al., 2017).

2.4.6 Einsatz der MRT zur Untersuchung von Knorpelgewebe in der Tiermedizin

In der tiermedizinischen Forschung wird die Methode der MRT zur Evaluierung von Knorpelgeweben häufig verwendet. Nachfolgend werden einige Studien aus der veterinärmedizinischen Knorpelforschung vorgestellt.

Tóth et al. (2013) haben die Visualisierung von Knorpelkanalgefäßen im epiphysealen Knorpel bei jungen Schweinen mittels eines Hochfeld-Magnetresonanztomographen untersucht, da die Knorpelkanalgefäße eine zentrale Rolle bei der *Osteochondrose dissecans* spielen. Die Auflösung der angefertigten Bilder reichte aber nicht aus, um kleine avaskuläre Bereiche zu identifizieren, wie sie in subklinischen Läsionen von Osteochondrose vorkommen. Damit scheint diese Methode nur ein begrenztes Potenzial für den klinischen Nutzen zu haben (Tóth et al., 2013).

Hamada et al. (2015) untersuchten Veränderungen des Femurknorpels im Kniegelenk beim Schwein mit einer T1- und einer T2-Wichtung unter abgestuften Belastungs- und Entlastungsbedingungen. Es wurden sagittale T1- und T2-gewichtete Bilder von den lateralen und medialen Kondylen unter folgenden Drucklasten angefertigt: keine (Drucklast 0), 140 N (Drucklast 140), 300 N (Drucklast 300) und keine Kompression nach der Dekompression. Die

Knorpelabnahme in der T1- und T2-Wichtung war bei einer Last von 300 N etwa doppelt so hoch wie bei einer Last von 140 N an der gesamten gewichtstragenden Fläche und an den meisten interessierenden Regionen (ROI). Die Kontaktdrücke waren unter einer Last von 300 N ungefähr 1,5 bis 1,7-mal höher als diejenigen unter einer Last von 140 N in beiden Kondylen. Diese Ergebnisse legen nahe, dass der Knorpel in der T1- und T2-Wichtung unter der Last mit verschiedenen Faktoren assoziiert ist, wie z.B. der Proteoglykan-Verteilung, dem Wassergehalt und der Deformation der Kollagen-Struktur im Inneren des Knorpels. Die Zusammensetzung und Dicke des Gelenkknorpels kann bei verschiedenen Spezies variieren, obwohl die Verteilungsmuster in der T2- und T1-Wichtung im Schweineknorpel denen des humanen Knorpels *in-vivo* ähnelten (Hamada et al., 2015).

Tóth et al. (2015) haben chirurgisch induzierte Knorpelnekrosen im distalen Femur von Ziegen mittels MRT untersucht. Durch die Identifizierung und Unterbrechung der vaskulären Versorgung von Teilen des distalen femoralen artikulär-epiphysären Knorpelkomplexes bei jungen Ziegen wurde eine Knorpelnekrose herbeigeführt, welche eine charakteristische Läsion der Osteochondrose darstellt. Anschließend wurden die nekrotischen Gebiete des Knorpels mittels MRT identifiziert und es wurde eine T1-gewichtete Sequenz von den entnommenen distalen Femora (nach Euthanasie der Tiere) mittels eines 9,4-Tesla-MRT-Scanners generiert. Die Unterbrechung der Gefäßversorgung des medialen Femurkondylus verursachte Läsionen in Form von Knorpelnekrosen bei 6 von 8 Ziegen in der histologischen Darstellung. Durch die MRT-Untersuchung wurden in 5 von 6 Fällen diese Gebiete mit Knorpelnekrosen identifiziert. Die Möglichkeit diese Gebiete der Knorpelnekrosen mittels der Hochfeld-MRT zu identifizieren, weist darauf hin, dass diese Technik nützlich sein könnte zur frühzeitigen Diagnostik einer *Osteochondrose dissecans* (Tóth et al., 2015).

Wei et al. (2015) haben frühzeitige Veränderungen in der Knorpelmatrix, welche durch Immobilisation in einem Kaninchenmodell induziert wurden, mittels einer T2-gewichteten Sequenz in einem MRT mit 7 T untersucht. Nach zwei Wochen zeigten die Kaninchen erhöhte T2-Werte (9,9% in der Trochlearille, 10,6% im

medialen Femurkondylus) sowie eine mattierte Knorpeloberfläche und einen verringerten Glykosaminoglykan-Gehalt (14,2 % in der Trochlearille und im medialen Femurkondylus). Nach drei Wochen wurden eine Erweichung und eine Unregelmäßigkeit der Knorpeloberfläche sowie ein deutlich reduzierter Glykosaminoglykangehalt festgestellt. Die T2-Werte korrelierten positiv mit Wasser ($r = 0,836$ in der Trochlearille, $r = 0,821$ im medialen Femurkondylus) und negativ mit dem Glykosaminoglykan-Gehalt ($r = -0,945$ in der Trochlearille, $r = -0,957$ im medialen Femurkondylus), haben aber keine erkennbare Beziehung mit dem Kollagengehalt ($r = -0,196$ in der Trochlearille, $r = -0,213$ im medialen Femurkondylus) (Wei et al., 2015).

Winkler (2017) hat in ihrer Dissertation am Lehr- und Versuchsgut Oberschleißheim die Knorpelvolumina am Kniegelenk von Zucht- und Mastschweinen unterschiedlicher Genotypen mittels Magnetresonanztomographie erfasst und die Knochenmineraldichte mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie gemessen. Es wurden 104 Zucht- und Mastschweine verschiedener Genetik zwei- bis dreimal mit einem MRT des Typs Siemens Magnetom Open (0,2T) unter Verwendung von T1-gewichteten Spin-Echo-Sequenzen untersucht. Die Sauen der Deutschen Landrasse zeigten ein schnelleres Wachstum und das Knorpelvolumen nahm signifikant ($1,06 \text{ cm}^3$, $p = 0,0001$) zwischen dem zweiten und dritten Scan ab. Bei Tieren der untersuchten Masthybriden (Piétrain x Deutsche Landrasse) kam es ebenfalls zu einer signifikanten Abnahme des mittleren Knorpelvolumens. Außerdem bestanden keine signifikanten Unterschiede der Knorpelvolumina der lateralen und medialen Gelenkknorpel an beiden Knien. Es war auffällig, dass mit steigendem Knochenmineralgehalt (oder Knochenmineraldichte) das Knorpelvolumen signifikant abnahm. „Die Beziehung zwischen Knorpelvolumen und Knochenmineraldichte beträgt $R^2 = 0,4$ (RMSE = 890 mm^3)“ (Winkler, 2017).

2.5 Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA)

2.5.1 Technisches Prinzip

Die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie ist ein projektives bildgebendes Verfahren, welches die Goldstandard-Methode bei der Bestimmung der Körperzusammensetzung auf molekularer Ebene darstellt und auf einem dreiteiligen Modell (Fettgewebe, Magerweichgewebe und Knochenmineral) basiert (Bazzocchi et al., 2016). Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt das 3-Komponenten-Modell.

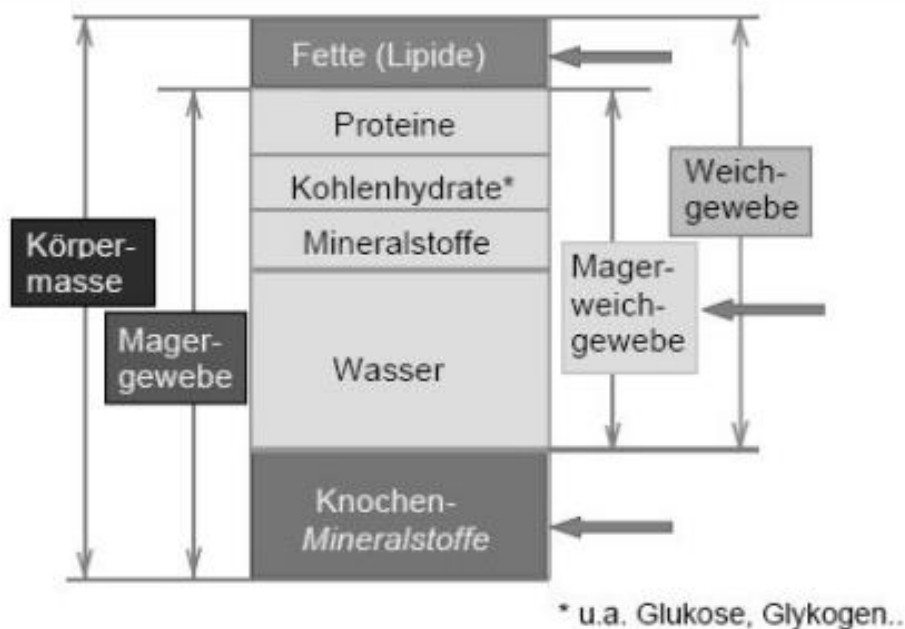


Abbildung 17: Darstellung des 3-Komponenten-Modells aus Scholz (2002)

DXA stellt ein zweidimensionales *In-vivo*-Durchstrahlungsverfahren dar und nutzt die gewebespezifische Abschwächung ionisierender Röntgenstrahlen (Scholz et al., 2016). Das physikalische Prinzip der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie beruht auf der Messung der Transmission von Röntgenstrahlung mit zwei Energieniveaus (hoch und niedrig) durch den Körper. Eine Röntgenquelle erzeugt einen Röntgenstrahl, welcher Photonen und elektromagnetische Energie überträgt. Die Energie des Röntgenstrahls wird während der Passage durch das Gewebe abgeschwächt. Diese Abschwächung

wird durch die Intensität der Energie sowie die Dichte und Dicke des Gewebes beeinflusst. Die Abschwächung des Röntgenstrahls nimmt in dem Maße ab, wie die Photonenenergie zunimmt (Bazzocchi et al., 2016).

Die Schwächung der Röntgenstrahlen ist verschieden, je nachdem durch welche Elemente mit unterschiedlichen Ordnungszahlen sie geleitet werden. Eine hohe Ordnungszahl hat eine stärkere Schwächung als eine niedrige Ordnungszahl zur Folge. Die Stärke der Schwächung wird durch den Masseschwächungskoeffizienten (μ in cm^2/g) beschrieben. Calcium (Ca) und Phosphor (P) im Knochenmineral absorbieren die Röntgenstrahlen stärker als das Weichgewebe (H, O, C). Dabei berechnet sich der Röntgenschwächungskoeffizient aus dem Verhältnis der Röntgenphotonenintensitäten für das hohe und das niedrige Energieniveau. Damit kann deutlich zwischen Knochen- und Weichgewebe unterschieden werden. Die lineare Beziehung von Röntgenschwächungskoeffizienten und prozentualen Fettgehalt wird verwendet, um die Pixel der Fettgewebe- und Nichtfettgewebeanteile zu bestimmen. Bei Pixeln mit Knochenmineral wird die Berechnung der Weichgewebezusammensetzung in Abhängigkeit von der benachbarten knochenmineralfreien Weichgewebezusammensetzung durchgeführt (Scholz et al., 2016). Der Unterschied in der Abschwächung der zwei Röntgenstrahlenergie-Peaks ist – geräte- bzw. energieabhängig - spezifisch für jedes Gewebe (Bazzocchi et al., 2016).

Mehrere Verfahren können für die Erzeugung von zwei Hauptenergie-Peaks angewendet werden. Eine Methode stellt das Einsetzen eines K-Edge-Filters aus seltenen Erden wie Cerium (Ce) oder Samarium (Sm) dar. Die Elektronen eines Atoms sind in konzentrischen Schalen gebunden. Die innerste Schale ist die K-Schale. Elektronen der K-Schale können diese verlassen, wenn die Photonenenergien genau gleich zu der Bindungsenergie der K-Schalen-Elektronen sind. Durch ihre Interaktion mit den K-Schalen-Elektronen werden die Photonen, die eine gleiche oder etwas größere Energie als die K-Schalen-Bindungsenergie aufweisen, geschwächt. Ein anderes Vorgehen zum Erzeugen eines Dualenergie-Röntgenspektrums ist das Auslösen eines Impulses in der Röntgenröhre zwischen den Messpunkten. Eine Quelle löst einen Strahl von

Photonen aus mit der Strahlungsintensität (I_0). So gelangen sie durch den Absorber. Atomare Interaktionen schwächen die Photonen exponentiell und die verringerte Strahlenintensität (I) wird vom Detektor erfasst (Pietrobelli et al., 1996).

Die gesenkte Strahlenintensität, welche den homogenen Absorber passiert, ist proportional zum linearen Schwächungskoeffizienten (μ) und der Weglänge (x). Die Variable d beschreibt die Differenz bzw. Änderung der Strahlenintensität bzw. der Gewebedicke (Hubbell, 1969). Dies wird in folgender Formel dargestellt:

$$-d(I/I_0) = \mu dx$$

Generell wird die Abschwächung in dem Maß kleiner wie die Photonenenergie ansteigt und ist größer für Substanzen mit größeren Werten des Masseschwächungskoeffizienten (Heymsfield et al., 1997). Das Verhältnis der Schwächungskoeffizienten wird anhand der Schwächung der zwei verschiedenen Energie-Peaks (R-Wert) gemessen. Der R-Wert von Weichgewebe ist immer verschieden und von der individuellen Weichteilgewebezusammensetzung des Patienten abhängig. Ein niedriger R-Wert korreliert mit einem hohen prozentualen Fettgehalt (Bazzocchi et al., 2016).

Jedes System nutzt eine Quelle (die Röntgenstrahlung mit zwei Energieniveaus erzeugt), einen Detektor und eine Schnittstelle mit einem Computersystem zur Darstellung der gescannten Region. Während der Untersuchung liegt der Proband auf einer Liege und wird geradlinig von Kopf bis Fuß gescannt. Die Sensoren erfassen in Bildpunkte (Pixel) aufgeteilte Informationen über die Röntgenschwächung in Weichgewebe allein oder Weichgewebe und Knochen. Zusätzlich ermöglicht die DXA-Software das Bestimmen des Knochenminerals und der Weichgewebezusammensetzung in verschiedenen Regionen des Körpers (Laskey und Phil, 1995).

Durch eine Untersuchung mittels DXA können folgende Parameter bestimmt werden (Scholz et al., 2015):

- Knochenmineraldichte [g/cm^2] (Bone Mineral Density = BMD)
- absoluter Knochenmineralgehalt [g] (Bone Mineral Content = BMC)
- Projektionsfläche der Knochenmineralfläche [cm^2]
- Fettgewebeanteil [%]
- Weichgewebe [g]
- Fettgewebe [g]
- Magerweichgewebe [g]

2.5.2 Vorteile der Untersuchung mittels DXA

Die Methode der DXA ist relativ leicht verfügbar und relativ kostengünstig. Die Verfügbarkeit der Daten ist schnell und die Analyse einfach (Scholz et al., 2016). DXA gilt als sehr genaue Methode zur Messung der Knochenmineraldichte und des Knochenmineralgehaltes (Mitchell et al., 1997). Durch die Umsetzung von Maßnahmen zur Standardisierung und Qualitätssicherung ist DXA eine verlässliche und klinisch sinnvolle Untersuchungsmethode (Glüer, 2017). Die Genauigkeit der Messungen ist sehr hoch und auch bei unterschiedlichen Körpergrößen sowie Körpertypen gewährleistet. Die Änderung der Werte von der Körperzusammensetzung beträgt bei der Durchführung mehrerer Scans des gleichen Objektes 0,5%. Durch die Verwendung von Phantomen kann die Messgenauigkeit überprüft werden (Shepherd et al. 2017). Durch diese genauen Messungen wird die Interpretation der Messergebnisse optimiert und die Wiederholbarkeit verbessert (Carey und Delaney, 2017). Außerdem ist DXA eine präzise, sichere und leicht anwendbare *In-vivo*-Methode (Laskey und Phil, 1995) und die genaue Analyse der Körperzusammensetzung von Subregionen ist möglich, da jedes Pixel im Scan-Bild einzeln ausgewertet wird (Nord, 1998). Die Untersuchung dieser Subregionen ist möglich durch die Unterteilung des Körpers mittels gut definierter Schnittlinien (Shepherd et al., 2017). Es kommt zu keiner Störung bei der Messung des Knochenmineralgehaltes, da Knochen- und Weichgewebe unabhängig voneinander gemessen werden. Außerdem handelt es sich um ein nicht invasives Verfahren. Es ist eine sehr komfortable

Untersuchungsmethode für den Probanden, da er weder in Wasser eingetaucht noch auf engen Raum eingeengt ist, wie es bei anderen Untersuchungsmethoden der Fall wäre. Ein weiterer Vorteil ist, dass alle DXA-Systeme durch verschiedene Algorithmen zur Berechnung der Zusammensetzung des über und unter dem Knochen liegenden Gewebes „versteckte“ Gewebemassen adäquat abschätzen können (Nord, 1998). Die Knochenmineraldichte (erhoben aus DXA-Analyse) ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Knochenwachstums und steht im Zusammenhang mit dem Risiko einer Knochenfraktur und struktureller Knochenstabilität beim Schwein (Laenoi et al., 2011). Die durch DXA gemessene Knochenmineraldichte und der Knochenmineralgehalt korrelieren positiv mit den in der chemischen Analyse gemessenen Konzentrationen von Calcium und Phosphor (Scholz et al., 2004; Sutlovic et al., 2016). Die effektive Strahlendosis eines Ganzkörper-DXA-Scans ($<10 \mu\text{Sv}$) entspricht der Dosis der normalen Hintergrundstrahlung auf Höhe des Meeresspiegels an einem Tag (Shepherd et al., 2017) und damit ist der Patient einer niedrigen Strahlendosis ausgesetzt (Salvatoni et al., 1998).

2.5.3 Nachteile der Untersuchung mittels DXA

Es können Schwierigkeiten bei der DXA-Messung bei Patienten mit massiver Adipositas auftreten, da die Anzahl der Röntgenphotonen, die den Körper durchdringen, sehr rapide mit steigender Körperdicke abnimmt. Eine Steigerung der Energie der Röntgenstrahlen liefert zwar eine bessere Durchdringung des Körpers, aber daraus resultiert auch ein schlechterer Kontrast zwischen Fett- und Magerweichgewebe. Obwohl die absorbierte Dosis sehr klein ist, kann der Kontakt zu ionisierender Strahlung als Nachteil gesehen werden. Außerdem sind die DXA-Scanner nicht leicht portabel und die Ergebnisse verschiedener Geräte sind nicht unmittelbar vergleichbar (Scholz et al., 2016). Außerdem muss auf die Ausrichtung des Scan-Objektes während des Scans geachtet werden, da je nach Ausrichtung die Messwerte variieren können. Es können verschiedene Werte gemessen werden, je nachdem ob das Scan-Objekt sich in einer horizontalen (stehenden) Position oder in einer vertikalen Position befindet (Mitchell et al., 1997).

2.5.4 Einsatzgebiete in der Humanmedizin

Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie ist die Goldstandard-Technik zur Messung der Knochenmineraldichte und Osteoporose-Untersuchung (Scholz und Baulain, 2009; Sutlovic et al., 2016). Ein diagnostischer Einsatz in der Humanmedizin findet auch bei Cushing, Hypogonadismus, Hyperthyreose, Hyperparathyreodismus, Störungen des Calciumsstoffwechsels, regionaler Enteritis, idiopathischer Proctocolitis, intestinaler Malabsorption, chronischen Nierendefekten, Vitamin D-Mangel und pathologischen Frakturen statt (Salvatoni et al., 1998). Durch die sehr gute Bildqualität können aktuelle DXA-Scans für die Analyse von Wirbelfrakturen und die Einteilung von abdominalen Verkalkungen der Aorta verwendet werden. Ganzkörpermessungen werden auch in Studien zu Ernährung, Adipositas und Sarkopenie eingesetzt. Für die präklinische Forschung wurden spezielle DXA-Geräte für BMD-Messungen bei kleinen Tieren entwickelt (Glüer, 2017). DXA kann auch bei Kindern, alten und gebrechlichen Menschen angewendet werden (Laskey und Phil, 1995).

In der nachfolgenden Tabelle 4 werden mögliche Ursachen für BMD-Veränderungen aufgezeigt.

Tabelle 4: Mögliche Ursachen für BMD-Veränderungen, modifiziert nach Carey und Delaney (2017)

erhöhte BMD	erniedrigte BMD
Osteodystrophia deformans	Einnahme von Glucocorticoiden
Osteoarthritis	Lytische Läsionen
Frakturen	Alterung
Therapie von Knochengewebe	Gewichtsverlust
Knochennekrose	Entfernung von Körpergewebe (Weich- oder Knochengewebe)
Osteosklerose	Positionierung des Patienten
Positionierung des Patienten	
Artefakte: Schmuck, Münzen, chirurgische Implantate	

2.5.5 Einsatzgebiete in der Tiermedizin

In der Literatur wurde die Methode der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie vielfach bei verschiedenen Spezies angewendet. Im Reviewpaper über den Einsatz von nichtinvasiven bildgebenden Verfahren in der Tierzucht von Scholz et al. (2015) werden eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen der DXA erläutert. Im nachfolgenden Abschnitt soll ein Überblick über den Forschungseinsatz der DXA in der Tiermedizin und Tierzucht gegeben werden

Swennen et al. (2004) haben den Einfluss von Scanmodus, Lagerung und Verwendung von Kunststoffolie als Abdeckungsmaterial bei der Bestimmung der Körperzusammensetzung von Hühnern mittels DXA bestimmt. Die Genauigkeit der Messungen wurde weder durch den Modus, noch durch die Lagerung der Versuchstiere oder die Kunststoffolie beeinflusst. Anschließend wurden die Werte der Körperzusammensetzung aus der DXA-Untersuchung mit denen einer chemischen Untersuchung verglichen. Dabei zeigten sich hohe Korrelationen ($r > 0,9$; $p < 0,0001$) bei allen DXA-Parametern mit Ausnahme des prozentualen Fettgehaltes ($r = 0,593$; $p < 0,05$) (Swennen et al., 2004).

Schreiweis et al. (2005) haben die Knochenmineraldichte und den Knochenmineralgehalt bei Hühnern der Rasse Weiße Leghorn *In-vivo* mit DXA und *Ex-vivo* mittels invasiven Referenzmethoden (Aschebestimmung und Bruchkraft der Knochen) in Abhängigkeit der Calcium-Fütterung untersucht. Die BMD- und BMC-Werte von *Tibia* ($r = 0,87$ und $0,82$, $p < 0,001$) und *Humerus* ($r = 0,94$ und $0,93$, $p < 0,001$) waren bei den lebenden Hühnern und den invasiven Referenzmethoden hoch korreliert. Somit eignet sich die Methode der DXA zur Anwendung an lebenden Vögeln (Schreiweis et al., 2005)

Böttinger (2006) untersuchte den Einfluss verschiedener Produktionssysteme auf die Körperzusammensetzung beim Schwein mittels DXA. Dafür wurden zwei Mastdurchgänge (Frühjahr/ Sommer und Herbst/ Winter) untersucht. Männlich kastrierte und weibliche Tiere der Kreuzung Deutsche Landrasse x Piétrain wurden gleichmäßig auf die Haltungssysteme Außenklimastall und Mehrzweckstall aufgeteilt. Die Tiere wurden mit einer Ganzkörpermessung mit dem DXA-Scanner „DPX-IQ“ dreimal im Verlauf der Mast untersucht. Die Tiere im Mastdurchgang Herbst/ Winter zeigten keine Unterschiede in der

Körperzusammensetzung bezüglich der verschiedenen Haltungssysteme und es gab keine Unterschiede in der Tageszunahme und Futterverwertung. Aber im zweiten Mastdurchgang (Frühjahr/ Sommer) wiesen die Schweine des Haltungssystems Außenklimastall in den Weichgewebe- und Knochenmineralparametern bessere Ergebnisse auf, mit Ausnahme des prozentualen Magerweichgewebeanteils. Die größere Knochenmineraldichte bei Tieren im Außenklimastall könnte durch die Möglichkeit der vermehrten Bewegung bedingt sein. Laut dieser Studie sind diese signifikanten Unterschiede durch das Klima zu erklären, welches der Haupteinflussfaktor ist (Böttinger, 2006).

Lösel et al. (2010) haben 77 Schweine mittels zwei verschiedener DXA-Scanner untersucht (GE Lunar DPX-IQ und Norland XR-26) und die ermittelten Messwerte beider DXA-Systeme miteinander verglichen. Dabei wurden folgende Bestimmtheitsmaße ermittelt: $R^2 = 0,92$ für Knochenmineralgehalt (g), $R^2 = 0,90$ für Knochenmineraldichte, $R^2 = 0,94$ für Magermasse, $R^2 = 0,92$ für Fettmasse, $R^2 = 0,88$ für Mageranteil (%) und Fettanteil (%), Daher ist zur direkten Vergleichbarkeit der Messwerte beider DXA-Scanner eine vorangehende Kreuzkalibrierung notwendig (Lösel et al., 2010).

Kremer et al. (2012) haben die Körperzusammensetzung von konventionellen und unkonventionellen Schweinerassen und Kreuzungen *In-vivo* mittels DXA und MRT untersucht. Cerdo Ibérico gefolgt von Duroc x Cerdo Ibérico Kreuzungen zeigten die höchsten prozentualen Fettgehalte (27,2%; 25,0%) in Kombination mit der kleinsten Lendenregion (46,2 cm²; 73,6 cm²). Hampshire x Piétrain-Kreuzungen wiesen den niedrigsten prozentualen Fettgehalt (12,4%) und die größte Lendenregion (99,5 cm²) auf. Die weißen Sauen-Linien (Deutsche Landrasse, German Large White) zeigten mittlere Werte der Körperzusammensetzung. Der BMD war bei der Duroc x Cerdo Ibérico-Linie am höchsten. Die Kombination von den Techniken DXA und MRT ist sehr gut geeignet, um die Schlachtkörperzusammensetzung bei lebenden Schweinen vorherzusagen (Kremer et al., 2012).

Salas et al. (2012) haben die Körperzusammensetzung von Masthähnchen der Linie Cobb500 sowohl mit DXA, als auch mit invasiver chemischer Analyse

(Asche, Etherextrakt und Protein) untersucht. Es wurden signifikante lineare Korrelationen zwischen den Komponenten der Körperzusammensetzung festgestellt, welche durch DXA und chemische Untersuchung bestimmt wurden ($R = 0,99, 0,99, 0,84, 0,94$ für das Gesamtgewicht, BMC, Fettgewebe und Weichgewebe, $p < 0,001$) (Salas et al., 2012).

Bernau et al. (2015) haben nicht-invasive-bildgebende-Verfahren zum Verbessern der genutzten Regressionsgleichungen für die Eberleistungsprüfung auf Station geprüft. Die Schätzung des Referenz-Magerfleisch-Prozentsatzes (LMP) basierend auf MRT und DXA wurde zur Kalkulation einer neuen Regressionsgleichung für ganze Schlachthälften von Ebern auf Grundlage der linearen Leistungsdaten genutzt. Die „neue“ LMP-Regressionsgleichung, welche auf der Kombination von MRT- und DXA-Daten basiert, ist so genau wie die ehemalige Regressionsgleichung, aber es werden nur drei statt sieben Variablen benötigt. Beim Vergleich mit dem Referenz-Magerfleisch-Prozentsatz aus der Zerlegung zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Formeln aus DXA, MRT und MRT/DXA die gleiche oder eine bessere Genauigkeit aufweisen, wie die Bonner Formel ($R^2 = 0,71-0,75$) (Bernau et al., 2015).

Rae et al. (2016) haben die Methode der DXA als Referenzmethode für die Untersuchung mittels „Multifrequency-Bioelectrical-Impedance-Analysis“ (MFBIA) zur Messung der Körperzusammensetzung bei Hunden untersucht. Die Methode der MFBIA ist sicher, nicht invasiv, transportabel und kostet weniger im Vergleich zu Techniken wie DXA. Als Ergebnis ging hervor, dass MFBIA basierte Einflusswerte eine genaue Messung der Fettfreien Masse (FFM) innerhalb 1,5 % zur Verfügung stellen im Vergleich zu DXA-abgeleiteten FFM bei normalgewichtigen Hunden. FFM-Schätzungen waren meist hoch korreliert mit DXA gemessenen FFM (Rae et al., 2016).

Soladoye et al. (2016) haben die Genauigkeit der Untersuchung mittels DXA bei der Beurteilung der Schlachtkörperzusammensetzung von Schweinen mit verschiedenen Charakteristika untersucht. Die DXA-Werte wurden genutzt zum Prognostizieren des analysierten chemischen Gehalts an Magerweichgewebe und Fett der Schlachthälften und Teilstücken. Die lineare Beziehung zwischen

analysierten Fett- und Magerweichgewebe bei allen Teilstücken und Schlachthälften war hoch ($R^2 > 0,94$, $p < 0,01$), mit niedriger RSD ($< 1,9\%$). Die Beziehungen zwischen DXA und chemischen Fett- und Weichgewebe der Schweinebäuche waren auch hoch ($R^2 > 0,94$, $p < 0,01$) mit einer RSD $< 2,9\%$. Die kastrierten Eber hatten signifikant mehr Fett (Soladoye et al., 2016).

2.6 Scoringssysteme im Rahmen der Lahmheitsdiagnostik beim Schwein

2.6.1 Prinzip von Scoringssystemen

Scoringssysteme enthalten üblicherweise mehrere Parameter, die durch eine Ordinalskala getrennt quantifiziert und anschließend in einer Gesamtpunktzahl kombiniert werden (Bein und Unertl, 1993; Klopffleisch, 2013). Durchschnittswerte der verschiedenen experimentellen Gruppen können dann durch nicht-parametrische statistische Tests verglichen werden. Die Auswahl der Parameter sollte auf der wissenschaftlichen Hypothese oder Frage basieren, zusammen mit dem aktuellen Wissen über das morphologische Ergebnis des untersuchten Modells (Klopffleisch, 2013).

Scorings basieren meistens auf dem visuellen Eindruck. Die Wiederholbarkeit ist definiert inwieweit die Beobachtungen an einem Untersuchungsobjekt bei demselben Beobachter mit den Beobachtungen an anderen Untersuchungsobjekten korrespondieren. Die Reproduzierbarkeit beschreibt, wie - bei Bewertung durch verschiedene Personen - die Scores von demselben Untersuchungsobjekt miteinander korrespondieren (van Steenbergen, 1989).

Scoringssysteme können auch zur Quantifizierung und Charakterisierung von der Erkrankungsschwere und Evaluierung von Patientengruppen auf der Basis objektiver Kriterien herangezogen werden. Dabei werden anatomische, biochemische, physiologische und therapeutische Parameter in die Vergabe der Punktwerte einbezogen. Von der Norm abweichende physiologische Parameter geben im Grad der Abweichung die Schwere einer Erkrankung wieder und werden als allgemeine Scores bezeichnet. Scores können zur Beurteilung von klinischen Studien oder Kosten-Nutzenanalysen durch die Charakterisierung von Patientenpopulationen genutzt werden, da sie ausreichend validiert sind. Ein objektives Merkmal bzw. Kriterium dient der Ersetzung der subjektiven Evaluierung. Scores können sowohl krankheitsübergreifend als auch erkrankungsspezifisch erstellt werden. Spezielle Scoring-Systeme dokumentieren in spezifischen Krankheitsbildern die pathologischen Merkmale (Bein und Unertl, 1993).

Außerdem finden Scoringssysteme Anwendung zur Evaluierung von Leistungsparametern in den Tierwissenschaften (Le et al., 2015). Die Beurteilung der Herde durch Body-Condition-Scoring (BCS) ist ein geeignetes Hilfsmittel für ein gutes Herdenmanagement (Keinprecht et al., 2016). Der Body-Condition-Score kann beim Schwein durch Rückenspeckdickemessungen mittels Ultraschall oder durch ein rein visuelles Scoring (Score 1= extrem kachektische; Score 5 = extrem adipöse Sau) bestimmt werden. Die Ergebnisse aus Rückenspeckdickemessungen und visuellen BCS-Scorings korrelieren nur mäßig ($r = 0,30-0,6$). Das zeigt, dass eine subjektive Bewertung nicht ausreichend ist, um ein zuverlässiges Bild der Rückenfettdicke von Sauen zu erhalten. Der Wert des visuellen Scorings der Rückenfettdicke bei Sauen ist abhängig von der Rasse, Produktionsphase und Parität der Sau (Maes et al., 2004).

2.6.2 Vor- und Nachteile von Scoringssystemen

Visuelle Scorings bedürfen geringer Ausgaben oder fast keiner Ausstattung und sind gut adaptiert für die Anwendung auf einem Betrieb, aber ein Mangel an Präzision und Verlässlichkeit sind problematisch bei der Anwendung durch Menschen, die nicht mit dem Scoring vertraut sind (Nalon et al., 2013). Von Nachteil ist, dass ein Scoring eine subjektive Einschätzung des Betrachters darstellt (Bein und Unertl, 1993).

2.6.3 Klauen- und Gelenkscoringsysteme beim Schwein

Klauenboniturscorings dienen der „Einteilung von Klauenverletzungen in verschiedene Kategorien, sodass die Schwere und Häufigkeit von Verletzungen im Bestand analysiert werden können“ (Ziron, 2014). In der Literatur sind zahlreiche Scoringssysteme zur Untersuchung der Klauen- und Gelenkgesundheit beim Schwein beschrieben. Nachfolgend soll ein Überblick über die verschiedenen in der Literatur verwendeten Scoringssysteme gegeben werden.

Bradley et al. (2007) haben mit Lahmheit assoziierte Klauenläsionen (Fersenerosion, Risse, überwachsene Ferse, Risse der weißen Linie, horizontale Wandrisse, vertikale Wandrisse, Rillen im Horn, Blutungen und

Abszesse) in drei aufeinanderfolgenden Zuchtzyklen bei 201 multiparen Sauen evaluiert. Es wurden jeweils Scores von 1 (= geringgradiger Befund) bis 3 (= hochgradiger Befund) vergeben.

Zoric et al. (2008) haben Abrasionen und Lahmheiten bei Ferkeln untersucht, welche in verschiedenen Abferkelsystemen mit verschiedenen Bodenarten geboren wurden. Eine Übersicht über dieses Scoringsystem befindet sich in der nachfolgenden Tabelle 5.

Tabelle 5: Scoringsystem von Zoric et al. (2008)

Score	Hautläsionen	Sohle
keine Läsion		
geringgradige Läsion	Haarlose Areale oder Haarausfall und leichte Hyperkeratose	Kleiner Teil der volaren Fläche der Zehe ist betroffen
mittelgradige Läsion	Hautabschürfungen	Weniger als die Hälfte der volaren Fläche der Zehe ist betroffen
hochgradige Läsion	Hautwunden, verhärtete Areale oder Schorf, welcher eine harte Masse hauptsächlich von getrocknetem Blut ist.	Mehr als die Hälfte der volaren Oberfläche der Zehe ist betroffen oder Erosion der Sohle, Verlust von Horngewebe

Deen et al. (2009) haben im Rahmen von FeetFirst® für das Unternehmen ZinPro (Eden Prairie, Minnesota, USA) ein Klauenboniturscoring erstellt. Dieses Scoring ist in Tabelle 6 abgebildet.

Tabelle 6: Klauenboniturscoring von Deen et al. (2009)

Merkmal	Score 1	Score 2	Score 3
	geringgradige Veränderungen	mittelgradige Veränderungen	hochgradige Veränderungen
Zehen	Eine oder mehr Klauen sind leicht länger als normal.	Eine oder mehr Klauen sind signifikant länger als normal.	Die Klauen sind so lang, dass sie den Gang beim Laufen beeinflussen.
Afterklauen	Afterklauen sind leicht länger als normal	Afterklauen berühren den Boden beim Stehen	Afterklauen sind abgerissen und/ oder fehlen komplett
Übermäßiges Fersenwachstum und Erosion	leichtes übermäßiges Fersenwachstum und/ oder Erosion im weichen Fersengewebe	zahlreiche Risse mit deutlichen übermäßigen Wachstum und Erosion	großer Umfang an Erosionen und übermäßigem Wachstum mit durchgehenden Rissen
Risse am Übergang Ferse/ Sohle	leichte Separation an der Verbindungsstelle	lange Separation an der Verbindungsstelle	lange und tiefe Separation an der Verbindungsstelle
Weiß-Linie	flache und/ oder kurze Separation (Trennung) entlang der Weißen-Linie	lange Trennung entlang der Weißen-Linie	sehr lange und tiefe Trennung entlang der Weißen-Linie
Horizontale Klauenwandrisse	offensichtliche Hämorrhagie, kurzer/ flacher horizontaler Riss in der Klauenwand	langer, aber oberflächlicher horizontaler Riss in der Klauenwand	mehrere Risse oder tiefer horizontaler Riss in der Klauenwand
Vertikale Klauenwandrisse	kurzer/ flacher vertikaler Riss in der Klauenwand	langer, aber oberflächlicher vertikaler Riss in der Klauenwand	mehrere oder tiefer vertikaler Riss in der Klauenwand

Pluym et al. (2011) haben die Prävalenz und Risikofaktoren von Klauenläsionen und Lahmheit bei tragenden Sauen in verschiedenen Gruppenhaltungssystemen mittels Klauenboniturschema untersucht. Die Beurteilung der Klauenläsionen wurde immer durch die gleiche Person durchgeführt und für jede Sau wurde der Gesamtscore durch Addierung der

Scores jeder Region der vier Klauen bestimmt. In dieser Studie nimmt die Lahmheit mit zunehmendem Alter ab, während der mittlere Klauenläsions-Score zunimmt. 38% der Sauen zeigten überlange Klauen, 39 % hatten überlange Afterklauen, 93 % wiesen Läsionen im Fersenbereich auf, 52 % waren von Läsionen im Wandbereich betroffen und 37 % der Sauen zeigten Läsionen an der Haut. Diese Ergebnisse zeigen, dass Lahmheit (besonders bei älteren Sauen) häufig durch andere Ursachen als Klauenläsionen hervorgerufen wird, da der Klauenläsionsscore sich nicht signifikant zwischen lahmen und nicht lahmen Sauen unterschied (Pluym et al., 2011). Das verwendete Klauenboniturscoring ist in Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 7: Klauenboniturscoring von Pluym et al. (2011)

Merkmal	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4
Länge der Klauen	normal	lang	zu lang	viel zu lang
Länge der Afterklauen	normal	lang	zu lang	abgerissene Afterklauen
Risse im Wandhorn	keine	kleine, oberflächliche Risse	tiefe Risse	Risse, die bis zum Kronsaum reichen
Risse/ Überwucherung vom Horn in der Fersenregion	keine	Risse	Überwucherung	hochgradige Risse und Überwucherung
Hautläsionen oberhalb der Klauen	keine	kleine Schürfwunde	Erosionen/ Wunden	große Wunden mit hochgradiger Entzündung

Olsson et al. (2016) haben ein vier Punkte Klauenscoring (0-3) zur Untersuchung von Klauenläsionen bei wachsenden weiblichen Schweinen verwendet. Das Schema dieses Scoringmodells ist in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Klauenboniturscoring von Olsson et al. (2016)

Score	Beobachtete Merkmale
0	keine Läsion/ kein übermäßiges Wachstum
1	ein oder wenige oberflächliche Risse oder Läsionen/ leichtes übermäßiges Wachstum
2	längere und tiefere Risse und Läsionen/ mittelgradiges übermäßiges Wachstum
3	tiefe Risse und Läsionen, die sich bis ins Korium ausdehnen, mit Zeichen einer Entzündung oder Blutungen/hochgradiges übermäßiges Wachstum unter Einbeziehung der ganzen Ferse

2.6.4 Lahmheitsscoring beim Schwein

Ein Lahmheitsscoring (Locomotion-Scoring) ist die Evaluation von der Fähigkeit eines Tieres normal zu gehen. Ordinalskalen beschreiben in der Literatur visuelle Locomotion-Scorings bei Schweinen bzw. Sauen. Aus klinisch-veterinärmedizinischer Sicht sind spezifische messbare Indikatoren der verschiedenen Erkrankungen festzulegen, um eine Diagnose ermitteln und Erkrankungen adäquat behandeln zu können (Nalon et al, 2013).

Das Beobachten und Erfassen des Schweregrades von Lahmheit in einer Herde kann als klinisches Tool zum Monitoring eines Lahmheitsproblems bzw. Krankheitsmanagement herangezogen werden. Ein verlässliches Scoringssystem kann in epidemiologischen Studien zur Identifikation potenzieller, ursächlicher Faktoren verwendet werden. Lahmheitsscoring-Systeme basieren auf einer einfachen deskriptiven Zahlenskala und wurden für viele Spezies entwickelt (Main et al., 2000).



Abbildung 18: Physiologisches Gangbild beim Wildschwein, © A.M. Scholz

Der einzige Weg die exakte Prävalenz von Lahmheit in einer bestimmten Herde zu bestimmen, ist die Beurteilung des Gangs von allen Tieren in dieser Herde. In den meisten Fällen ist dies nicht durchführbar, daher wird die Lahmheits-Prävalenz auf Herdenebene aus einer Subpopulation von Tieren berechnet (Nalon et al., 2013). Im Vergleich zu anderen Spezies haben Schweine physiologisch einen gestelzten Gang (Locomotion) und die natürliche Reaktion auf diese Beeinträchtigung ist eine eher kurze und schnelle Fortbewegung, als ein beständiger und ruhiger Gang oder Trabbewegungen. Ihr relativ kurzer Nacken limitiert die potenzielle vertikale Bewegung des Kopfes (Main et al., 2000)

Im Nachfolgenden wird ein Überblick über die Anwendung von Locomotion-Scoringsystemen beim Schwein in der tiermedizinischen Wissenschaft gegeben.

Van Steenbergen (1989) hat für ein lineares Bewertungssystem von Exterieurmerkmalen die Korrelation zu Reproduktionsmerkmalen und Langlebigkeit untersucht. Bei der Beurteilung des Scoringsystems wurden Unterschiede zwischen den Bewertungspersonen, Verwendung der 19 Kategorien (0 bis 9 mit 0,5 Punktschritten), Exaktheit des Bewertungsschemas und Beziehungen zwischen den Merkmalen einbezogen. Insgesamt wurden 40 Eber zweimal von 10 Beobachtern untersucht. Es traten Unterschiede zwischen den Untersuchern in den Mittelwerten und Standardabweichungen auf. Auffällig war, dass viele Beobachter ganzzahlige Scores vergaben. Die Wiederholbarkeit betrug im Mittel 0,60 und die Reproduzierbarkeit 0,30 (van Steenbergen, 1989).

Main et al. (2000) haben das Design eines einfachen, wiederholbaren Scoring-Systems zur quantitativen Bestimmung von Lahmheit (ohne Berücksichtigung des potenziellen Lahmheitsgrundes) untersucht. Es wurde Lahmheit in einer einzigen Herde von 600 wachsenden Schweinen mit einem Körpergewicht zwischen 40 und 100 kg untersucht. Die Schweine wurden auf Teilspalten-Betonboden in Gruppen von 12 bis 18 Tieren gehalten. Das verwendete Scoring-System basiert auf dem Verhalten, der Körperhaltung und dem Gangbild der Schweine und es wurden Scores von 0 bis 5 vergeben. Eine tabellarische Übersicht über das Scoringssystem befindet sich in Tabelle 9.

Tabelle 9: Übersicht Scoringssystem von Main et al. (2000)

Score	Gang
0	Gleichmäßige Schritte. Kaudaler Körper schwingt leicht beim Gehen. Schwein ist in der Lage zu Beschleunigen und die Richtung schnell zu wechseln
1	Abnormale Schrittlänge (nicht leicht zu erkennen). Bewegung nicht mehr fließend. Schwein erscheint angespannt. Schwein kann noch beschleunigen und die Richtung ändern
2	Verkürzte Schritte. Festzustellende Lahmheit. Aufkrümmen des kaudalen Körpers beim Laufen. Keine Beeinflussung der Mobilität des Schweines.
3	Verkürzte Schritte. Minimale Belastung der betroffenen Gliedmaße. Aufkrümmen des kaudalen Körpers beim Laufen. Traben und Galoppieren noch möglich
4	Schwein kann den betroffenen Fuß beim Bewegen nicht auf den Boden aufsetzen.
5	Keine Bewegung möglich.

Zwei Beobachter, die mit dem Scoringssystem vertraut waren, evaluierten 201 zufällig ausgewählte Schweine. Zwischen diesen beiden Betrachtern gab es eine hohe Übereinstimmung (94%). In einer separaten Studie beurteilten 7 Tiermedizin studierende, die nicht mit dem Scoringssystem vertraut waren, 19 Schweine. Der Anteil der Scorewerte, die identisch waren zwischen den mit dem Scoring vertrauten und nicht vertrauten Beobachtern lag im Bereich von 26-53 %. Bei 4 von 7 Beobachtern gab es eine signifikante Übereinstimmung (p-Wert <0,05). Die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass der Score-Test unzuverlässig war, wenn er von mit dem Scoring nicht vertrauten Beobachtern durchgeführt wurde (Main et al., 2000).

Karlen et al. (2007) haben ein Lahmheitssoring in Kombination mit anderen Messungen durchgeführt um das Wohlbefinden der Sauen in konventionellen Ställen vergleichend zu Sauen in Gruppenhaltung auf Tiefstreu zu untersuchen (siehe Tabelle 10). Sauen, die in Gruppenhaltung lebten, hatten signifikant mehr Risse ($p < 0,001$). Die meisten Risse stammten wahrscheinlich von aggressiven Auseinandersetzungen. Abschürfungen befanden sich hauptsächlich an den Klauen der Hintergliedmaßen (Karlen et al., 2007).

Tabelle 10: Scoring-System nach Karlen et al. (2007)

Score	Beobachtete Merkmale
0	Normale Fähigkeit zum Stehen und Bewegen; symmetrische Bewegungen der Gliedmaßen
1	Normale Fähigkeit zum Stehen und Bewegen, Beine tragen das Gewicht gleichmäßig aber beeinträchtigt
2	Moderate Lahmheit: deutlich reduzierte Fähigkeit zum Stehen; Bewegungen sind vermindert oder schwer; unfähig Gewicht auf der betroffenen Gliedmaße zu tragen; häufige Gewichtsverlagerungen
3	Schwere Lahmheit: beeinträchtigte Fähigkeit zum Stehen und Bewegen; eine oder mehrere Gliedmaßen werden nicht mit Gewicht belastet, oft mit geschwollenen Gelenken; Steifheit; wiederholte Lautäußerung wenn eine Bewegung gemacht wird

Das folgende Scoringssystem (Tabelle 11) stammt aus dem Welfare Quality® Protokoll (2009) und stellt ein Lahmheits-Scoring zur Untersuchung auf Betriebsebene für Sauen, Ferkel und Mastschweine dar.

Tabelle 11: Lahmheits-Scoring des Welfare Quality Protokoll® (2009)

Score	Beobachtete Merkmale
0	Normaler Gang oder das Tier hat Schwierigkeiten beim Laufen, die Schritte können verkürzt sein und/ oder es existiert eine Aufwölbung des kaudalen Teils des Körpers während des Laufens
1	Das Tier ist schwer lahm; es wehrt sich die betroffene Gliedmaße zu belasten.
2	Es gibt keine Gewichtsbelastungen der betroffenen Gliedmaße oder das Tier ist unfähig zum Laufen.

Die Zinpro Corporation (2009) hat als funktionales Hilfsmittel zur frühen Erkennung von Beschwerden der Gliedmaßen und Läsionen, der Überwachung der Prävalenz der Lahmheit in einer Herde, zum Vergleich der Inzidenz und Schwere von Lahmheit zwischen Herden sowie zur Identifizierung einzelner Sauen, die eine funktionellen Klauenpflege benötigen, ein weiteres Lahmheitssoring (Tabelle 12) entwickelt.

Tabelle 12: Lahmheits-Scoring der Zinpro Corporation (2009)

Score	Beobachtete Merkmale
0	Sauen bewegen sich leicht mit wenig Beeinflussung. Die Sau steht komfortabel auf allen ihren Füßen.
1	Sie bewegt sich relativ leicht, aber sichtbare Zeichen von Lahmheit gibt es mindestens an einem Bein. Sie belastet ungern dieses Bein, aber sie läuft immer noch leicht von einer Seite zur anderen im Stall.
2	Lahmheit ist sichtbar an einer oder mehreren Gliedmaßen. Die Sau zeigt kompensatorisches Verhalten wie zum Beispiel Senken des Kopfes oder Krümmen des Rückens.
3	Die Sau läuft weniger und eine oder mehrere Gliedmaßen werden vermindert mit Gewicht belastet. Es ist schwierig für die Sau sich von einer Seite zur anderen im Stall zu bewegen.

Mustonen et al. (2011) haben den Effekt von Ketoprofen bei der Behandlung von nicht infektiös bedingter Lahmheit untersucht. Die Erfolgsrate der Behandlung betrug 54,3 % für die Gruppe, die Ketoprofen in der Dosierung 4 mg/ kg (n = 46) und 53,2 % für die Gruppe, die Ketoprofen in der Dosierung 2

mg/ kg (n = 47) erhalten hat sowie 20,8 % für die Schweine in der Placebogruppe (n = 48). Der Unterschied zwischen beiden Versuchsgruppen (2mg/ kg Ketoprofen und 4mg/ kg Ketoprofen) und der Placebogruppe war signifikant (p = 0,001), aber es gab keinen Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen, die Ketoprofen erhalten haben (p = 0,78). Die orale Gabe von Ketoprofen wurde von den Schweinen gut vertragen. Folgendes Lahmheits-Scoring (Tabelle 13) wurde verwendet:

Tabelle 13: Lahmheitsscoring von Mustonen et al. (2011)

Score	Beobachtete Merkmale
0	Keine Lahmheit
1	Minimal: steif, ataktischer oder schwankender Gang, verkürzte Schritte
2	Gering: Schwäche sichtbar, aber Tier bewegt sich normal
3	Moderat: deutliche Präsenz der Gliedmaßen zu jeder Zeit (mit Kopf senken), Tiere haben einige Schwierigkeiten mit Bewegungen, moderate kyphotische Körperhaltung
4	Schwer: Tier belastet betroffene Gliedmaße kaum bzw. gar nicht; schwer lahm, aber fähig zur Bewegung; schwere kyphotische Haltung

Pluym et al. (2011) haben die Prävalenz und Risikofaktoren von Klauenläsionen und Lahmheit bei tragenden Sauen in zwei verschiedenen Gruppenhaltungssystemen untersucht. Zur Lahmheitsbeurteilung wurden zwei Kategorien festgelegt und die Sauen entweder als lahm oder nicht lahm kategorisiert (Pluym et al., 2011).

Grégoire et al. (2013) haben für die Validierung von quantitativen Techniken zur Bewertung von Lahmheit bei Sauen folgendes Lahmheitsscoring (Tabelle 14) verwendet:

Tabelle 14: Lahmheitsscoring von Grégoire et al. (2013)

Score	Beobachtete Merkmale
1	Sau läuft mit geraden Schritten und keine Probleme im Gang sichtbar.
2	Abnormale Schrittlänge wird beobachtet. Bewegungen sind nicht länger fließend, aber keine offensichtliche Lahmheit wird beobachtet.
3	Verkürzte Schritte. Lahmheit wird detektiert/ wahrgenommen. Aufwölben des kaudalen Körpers ist sichtbar, wenn die Sau läuft.
4	Sau setzt die betroffene Gliedmaße nicht auf den Boden auf.
5	Sau ist bewegungsunfähig.

Lahme Sauen gingen langsamer, hatten eine kürzere Schrittlänge und zeigten eine längere Standzeit als nicht lahme Sauen (Grégoire et al., 2013).

Nalon et al. (2013) geben einen Überblick über die Durchführung und Bewertung von Messmethoden zur Klassifizierung von Klauenläsionen und Lahmheit. Es ist nicht möglich diese Merkmale nur visuell zu scoren, aber es stehen validierte automatisierte Detektionsmethoden zur Verfügung für die Kombination beider Untersuchungsmethoden. Einige visuelle Scoringsysteme können äußerst effizient in Herden-Screening-Programmen oder innerhalb von Zertifizierungs- oder Bewertungsschemen genutzt werden. Einige automatisierten Detektionssysteme, wie z. B. Kraftmessplatten, haben das Potenzial zur Integration in bestehende Farm-Technologien (wie z.B. elektronische Fütterungsstationen). Abhängig von der spezifischen Pathogenese von Lahmheit zeigen betroffene Tiere verschiedene klinische Symptome. Daher ist ein mehrdimensionales Herangehen, welches visuelle und automatische Detektionssysteme integriert und zur Beschreibung sowohl dynamische als auch statische Variablen verwendet, zum besseren Verständnis und zur Bewertung der verschiedenen Charakteristika geeignet. Wenn Methoden wie Beobachtungen der Klauenläsionen, kinematischen Analysen und „Kraftmessplatten-Analysen“ kombiniert genutzt werden, geben diese Methoden präzise Informationen für jede Gliedmaße in Bezug auf Gelenkbiomechanik, Gewichtsverteilung und Präsenz von Läsionen. Visuelle Beobachtungen werden generell bevorzugt, weil sie leicht anzuwenden sind und es ermöglichen lahme Schweine zu identifizieren. Das Liegeverhalten nach dem Fressen ist auf Herdenebene ein guter Indikator zum Identifizieren lahmer Schweine. Aus Sicht der Forschung müssen die Bewertungstechniken hohe Anforderungen an Sensitivität und Spezifität erfüllen. Hochtechnologische Techniken (wie Kinematik, „Kraftmessplatten-Skalen“, Beschleunigungsmesser) sind teuer, aber beantworten Forschungsfragen und können zu einer Arbeitersparnis führen (Nalon et al., 2013)

Nalon et al. (2014) haben die Wiederholbarkeit innerhalb und zwischen Beobachtern bei der Anwendung von drei verschiedenen Gang-Scoring-Skalen bei Sauen untersucht. Die meisten Gang-Scoring-Skalen für Schweine haben

eine limitierte Anzahl an Kategorien um die Wiederholbarkeit zu verbessern, aber dies kann zu einem Informationsverlust führen. Bei dem ersten von Nalon et al. (2014) verwendeten Scoringssystem handelt es sich um eine regelmäßige visuelle analoge Skala (tVAS, gemessen in mm, Abbildung 19).

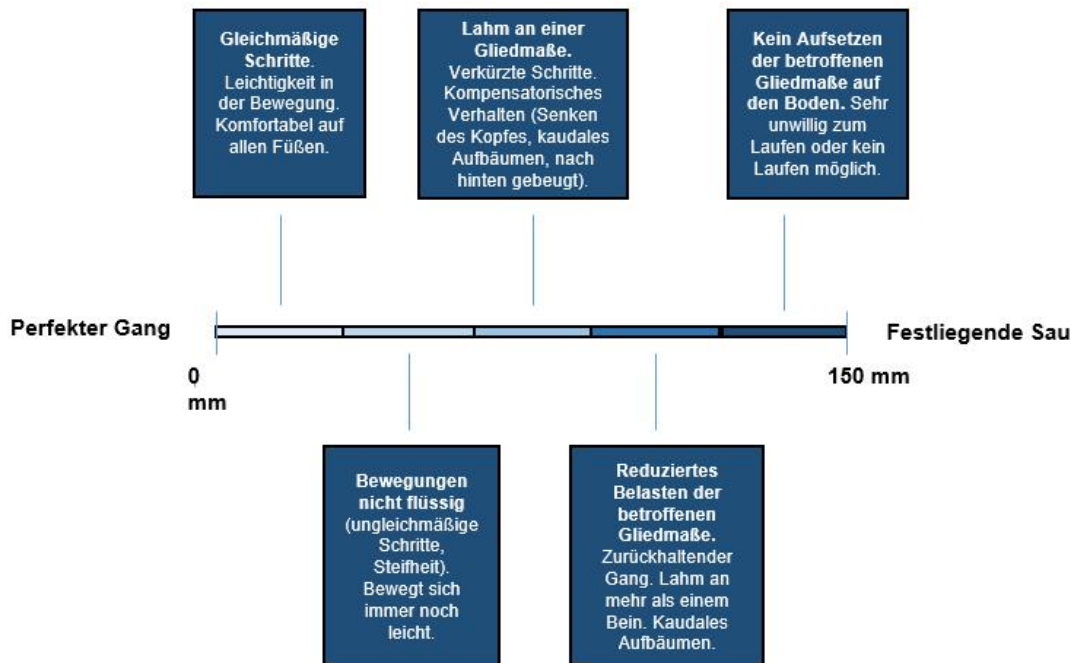


Abbildung 19: Darstellung der tVAS-Skala, modifiziert nach Nalon et al. (2014)

Das zweite Scoringssystem stellt eine 5-Punkte-Ordinal-Skala dar und entspricht ansonsten dem in Abbildung 19 dargestellten Scoringssystem.

Das dritte verwendete Scoringmodell basiert auf einer 2-Punkt-Ordinal-Skala. Es wurden Scores von 0 bis 1 vergeben. Die von Nalon et al. (2014) genutzte 2-Punkt-Ordinal-Skala ist in Tabelle 15 abgebildet.

Tabelle 15: 2-Punkt-Ordinal-Skala (2P), modifiziert nach Nalon et al. (2014)

Score	Gang
0	Gleichmäßige Schritte. Leichtigkeit in der Bewegung. Komfortabel auf allen Füßen
	Bewegungen nicht flüssig (ungleichmäßige Schritte, Steifheit). Bewegt sich immer noch leicht.
1	Lahm an einer Gliedmaße. Verkürzte Schritte. Kompensatorisches Verhalten (Senken des Kopfes, kaudales Aufbäumen, nach hinten gebeugt).
	Reduziertes Belasten der betroffenen Gliedmaße. Zurückhaltender Gang. Lahm an mehr als einem Bein. Kaudales Aufbäumen.
	Kein Aufsetzen der betroffenen Gliedmaße auf den Boden. Sehr unwillig zum Laufen. Kein Laufen möglich.

Die Beobachter (Studierende und Experten) vergaben höhere Scorewerte mit der tVAS als mit der 2P-Skala. Bei nicht lahmen Sauen (Gang-Score von ≤ 45 mm bei tVAS) war die Wiederholbarkeit bei allen drei Skalen niedriger ($p < 0,05$) als bei lahmen Sauen (Gangscore > 45 mm). Die Einstellung des Beobachters zur Score-Skala und bisherige Erfahrungen im Handling mit Schweinen oder Lahmheitsscoring-Systemen bei anderen Spezies hatten keinen Effekt auf die Wiederholbarkeit. Die Korrelationen zwischen den Score-Ergebnissen von Studierenden und Experten war hoch (tVAS = 0,92; 5P = 0,91; 2P = 0,88). Diese Studie zeigt, dass es möglich ist, hochauflösende Gang-Scoring-Skalen zu designen, welche die Wiederholbarkeit nicht reduzieren. Visuelle Gang-Scoring-Skalen mit weniger als 5 Kategorien bedingen einen Verlust von Informationen über die Lahmheit bei den einzelnen Sauen (Nalon et al., 2014).

Ala-Kurikka et al. (2017) haben mit Lahmheit assoziierte Verhaltensänderungen untersucht. Auf die Ergebnisse der Studie wurde bereits näher im Kapitel 2.3.6 „Tierwohl“ und Verhalten eingegangen. Es kam folgendes Scoring (Tabelle 16) zum Einsatz um die Lahmheit zu bewerten:

Tabelle 16: Lahmheitsscoring nach Ala-Kurikka et al. (2017)

Score	Lahmheits-Grad	Symptome
0	Keine	keine Lahmheit
1	Minimal	steifer, ataktischer oder schwankender Gang, verkürzter Schritt
2	Gering	sichtbar kraftlos, aber unbekümmert und normale Bewegungen
3	Mittel	offensichtlich schlaff präsent die ganze Zeit (mit Kopf schaukeln), Tier hat einige Schwierigkeiten bei der Bewegung, moderate kyphotische Haltung
4	Schwer	Tier trägt kaum Gewicht/ nicht belastbar, stark lahm, aber bewegungsfähig, schwere kyphotische Haltung

Die eben vorgestellten Studien zum Thema Lahmheit haben sehr unterschiedliche wissenschaftliche Fragestellungen und Forschungsschwerpunkte. Daher kann es sinnvoll sein für jede Studie ein individuelles Scoringssystem zu entwickeln, das die jeweilige wissenschaftliche Fragestellung bestmöglich beantwortet. Standard-Scoring-Systeme erlauben aber andererseits den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien. Die Auswahl der Parameter beruht in den meisten Scoringssystemen auf dem allgemeinen Wissen über die Pathogenese einer Krankheit (Klopfleisch, 2013). Unterschiede zwischen verschiedenen Studien können nicht nur aufgrund unterschiedlicher Prävalenzen auftreten, sondern auch aufgrund unterschiedlicher Definitionen von Lahmheit oder aufgrund der verschiedenen Methoden zur Beurteilung der Lahmheit (Heinonen et al., 2013).

3 Versuchstiere und Methoden

3.1 Versuchstiere

Der Tierversuch wurde von der Regierung von Oberbayern unter folgendem Aktenzeichen genehmigt: 55.2-1-54-2532.0-38-2016.

Zur Durchführung des Versuches wurden 127 Masthybriden verwendet. Als Vatterrasse kamen Piétraîneber zum Einsatz und als Mutterrasse wurden Deutsche Landrassesauen verwendet. Alle 127 Versuchstiere stammten aus dem Bestand des Lehr- und Versuchsguts Oberschleißheim der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians- Universität München.

Die Versuchstiere wurden im Alter von 4 Wochen von der Sau abgesetzt. Die weitere Ferkelaufzucht erfolgte im Flatdeck auf Kunststoffspaltenboden. Nach der 1. Untersuchung wurde eine Hälfte der Versuchstiere im Außenklimastall (AKS) auf Tiefstreu (Stroh) und die andere Hälfte im Mehrzweckstall 1 (MZST) auf Vollspaltenboden aus Beton aufgestellt. Im Außenklimastall führte eine Rampe vom mit Stroh eingestreuten Liegebereich zum mit Betonspalten ausgestatteten Fressbereich. Im Mehrzweckstall bestand der gesamte Boden einer Bucht aus Betonspalten (sogenannten Ökobetonspalten). Auf den nachfolgenden Abbildungen (Abb.20-23) wurde die Unterbringung der Schweine im Außenklimastall und im Mehrzweckstall dargestellt.



Abbildung 20: Außenklimastall mit Tiefstreu und erhöhtem Fressbereich mit Spaltenboden sowie Doppelfitmixfutterstation (ehemals Fa. Mannebeck)



Abbildung 21: Schweine im Liegebereich des Außenklimastalles



Abbildung 22: Mehrzweckstall mit Öko-Vollspaltenboden



Abbildung 23: Breifutterautomaten im Mehrzweckstall

Alle Versuchstiere wurden während der Mast *ad libitum* mit zwei selbsthergestellten Alleinfuttermitteln (Vormastmischung/ Endmastmischung) in Form von Pellets gefüttert. Bis zum Tag 70 der Mast erhielt jedes Schwein das Vormastfutter. Ab Tag 71 bis zum Ende der Mast wurde das Endmastfutter gefüttert. Die Zusammensetzung der Futtermittel wird in der nachfolgenden Tabelle 17 dargestellt. Ausreichend Trinkwasser stand den Tieren jederzeit zur Verfügung.

Tabelle 17: Zusammensetzung der Futtermittel in Vor- und Endmast

Zeitpunkt der Mast	Bestandteil	Anteil [%]
Vormast	Gerste	31,00
	Weizen	22,00
	Mais	22,00
	Sojaschrot	21,00
	Mineralfutter: Mastkraft	3,00
	ADDCON FORMI	1,00
Endmast	Gerste	55,00
	Weizen	12,00
	Hafer	5,00
	Mais	11,00
	Soja	13,50
	Mineralfutter: Mastkraft	2,50
	ADDCON FORMI	1,00

3.2 Methoden

3.2.1 Versuchsaufbau

Die Tiere wurden im Verlauf des Versuchs dreimal untersucht. Zur ersten Untersuchung waren die Schweine 11 Wochen alt und hatten ein Gewicht von ca. 30 kg. Einen Tag nach der Untersuchung wurden die Tiere entweder in den Außenklimastall mit Tiefstreu (AKS) oder in den Mehrzweckstall mit Vollspaltenboden (MZST) aus Beton eingestallt. Nach weiteren 62 Tagen fand die zweite Untersuchung statt. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Schweine ein Gewicht von ca. 60 kg. Nach weiteren 28 Tagen fand die 3. Untersuchung statt. Bei dieser letzten Untersuchung wiesen die Tiere ein Gewicht von ca. 90 kg auf. Der Aufbau des Versuches wird schematisch in Abbildung 24 dargestellt.

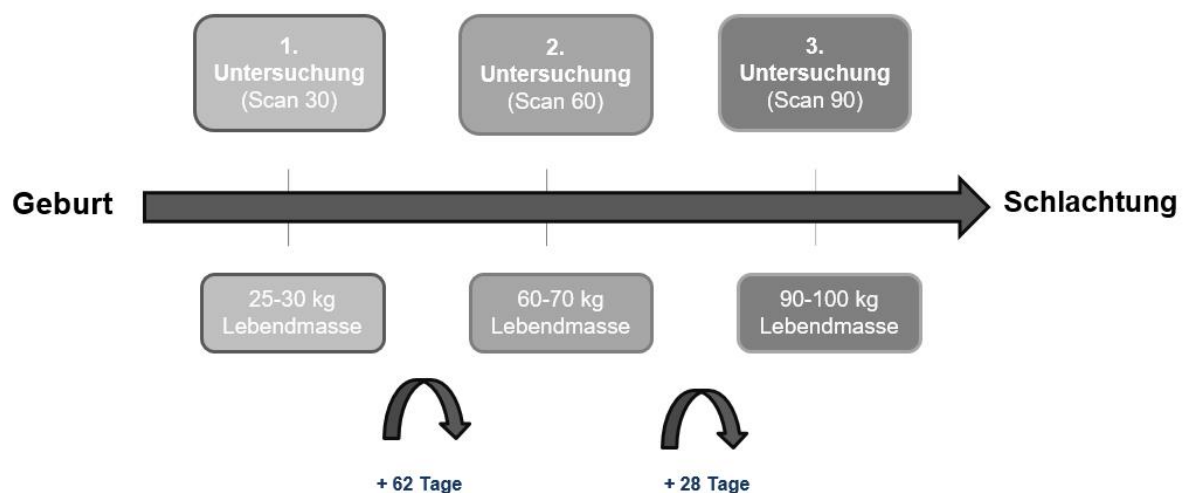


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues

Um einen ausreichenden Stichprobenumfang zu erhalten, wurde der Versuch dreimal wiederholt. Dafür wurden die Tiere in 3 Gruppen eingeteilt. In jeder Versuchsgruppe wurde die Anzahl weiblicher und männlicher Tiere in etwa gleich verteilt. Tabelle 18 zeigt die Auflistung der Versuchstiere entsprechend der Gruppen.

Tabelle 18: Übersicht Versuchsgruppengliederung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gesamtanzahl	43	42	42
Anzahl Tiere Vollspalten (MZST)	22	20	21
Anzahl ♂- Tiere	11	8	11
Anzahl ♀- Tiere	11	12	10
Anzahl Tiere Tiefstreu (AKS)	21	22	21
Anzahl ♂- Tiere	10	11	11
Anzahl ♀- Tiere	11	11	10
Vater (Piétrain-Eber)	Borussia	Romul	Ringol

3.2.2 Vorbereitung der Tiere für die Untersuchungen

Am Vortag der einzelnen Untersuchungen wurden die Tiere bereits in den Versuchsstall (sogenannten Mehrzweckstall 2) umgestallt. Alle Untersuchungen, außer das Lahmheitssoring, wurden am narkotisierten Tier durchgeführt. Um das Narkoserisiko zu senken, wurde den Tieren ca. 16 h vor der Untersuchung kein Futter mehr angeboten. Am Untersuchungstag wurde jedes Schwein gewogen und erhielt anschließend eine intramuskuläre Injektionsnarkose aus Azaperon (2mg/kg, Stresnil®, Elanco) und Ketamin (20mg/kg, Ursotamin ®, Serumwerk Bernburg) in den Ohrgrund. Nach dem Wirkeintritt der Narkose wurde jedem Versuchstier ein Venenverweilkatheter in die Ohrvene gelegt, damit bei Bedarf Ketamin (2mg/kg) nachdosiert werden konnte.

3.2.3 Untersuchung mittels Magnetresonanztomographie

Für die Untersuchung mittels Magnetresonanztomographie wurde ein Siemens Magnetom Open (offenes MRT-System) mit einer Feldstärke von 0,2 Tesla verwendet.

3.2.3.1 Lagerung der Versuchstiere

Zur Untersuchung im Magnetresonanztomographen wurde jedes Schwein auf dem Untersuchungstisch in Bauchlage positioniert. Die Vordergliedmaßen wurden nach kranial und die Hintergliedmaßen nach kaudal gestreckt. Jedes Tier wurde gerade positioniert. Danach wurde die große Körperspule auf der Höhe der zu untersuchenden Region platziert. Die Positionierung eines Schweines zur Untersuchung der Schulterregion wurde in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25: *Positionierung eines Schweines auf dem Siemens Magnetom Open*

3.2.3.2 Verwendete Messprotokolle und gewählte Untersuchungsregionen

Bevor eine Sequenz angefertigt wurde, wurden von der zu untersuchenden Region Übersichtsaufnahmen (sogenannte Scout- oder Localizer-Aufnahmen) erstellt. Anhand dieser Übersichtsaufnahmen können die Zielsequenzen vor der Messung exakt positioniert werden.

Es wurden von jedem Versuchstier zwei T1-gewichtete Sequenzen angefertigt. Für das linke Ellbogen- und Schultergelenk wurde eine sagittale Sequenz verwendet und vom rechten und linken Kniegelenk wurde eine coronare Sequenz angefertigt. Die Parameter der verwendeten Sequenzen werden in der nachfolgenden Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Parameter der verwendeten MRT-Sequenzen

Parameter	Schulter/ Ellbogen sagittal	Knie coronar
Wichtung	T1	T1
Pixel-Größe	2,17 x 1,17 mm	1,8 x 1,8
Scan- Zeit	3 min 47 sec	3 min 17 sec
Repetitionszeit (TR)	814 ms	380 ms
Echozeit (TE)	17 ms	15 ms
Flip-Winkel	90°	90°
Anzahl der Schnittbilder	22	10
Schichtdicke	4 mm	15 mm
Distanz- Faktor	0	0,25
Matrix	54 %, 138 x 256	100 %, 256 x 256
Untersuchungsfeld (FOV)	300 mm	461 mm

3.2.4 Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

Für die Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) wurde ein Scanner vom Typ GE Lunar iDXA (GE Healthcare GmbH, Solingen, DE) des Lehr- und Versuchsgutes Oberschleißheim verwendet.

3.2.4.1 Lagerung der Versuchstiere

Zur Durchführung dieser Untersuchung wurden die Tiere gerade in Bauchlage positioniert (Abbildung 26). Die Vordergliedmaßen wurden nach kaudal gebeugt und seitlich des Tierkörpers positioniert. Die Hintergliedmaßen wurden nach kaudal gestreckt.



Abbildung 26: Positionierung eines Schweines auf dem DXA-Scanner

3.2.4.2 Verwendetes Messprotokoll

Von jedem Schwein wurde zu jedem Untersuchungstermin ein Ganzkörperscan im Standard-Modus angefertigt. Die Expositionsfaktoren werden in der nachfolgenden Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Expositionsfaktoren der Untersuchung mittels DXA

Einheit	Wert
Spannung [kV]	1000
Strom [mA]	0,188
Dosis [μGy]	3,0

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Knochenmineraldichte (Bone Mineral Density = BMD in g/cm^2), der absolute Knochenmineralgehalt (Bone Mineral Content = BMC in g), die Projektionsfläche der Knochenmineralfläche [cm^2] sowie der Fettgewebeanteil [%], das Weichgewebe [g], das Fettgewebe [g] und das Magerweichgewebe [g] mittels DXA-Scanner vom Typ GE Lunar iDXA (GE Healthcare GmbH, Solingen, DE) gemessen.

3.2.5 Untersuchung der Klauenwinkel

Für die Untersuchung der Klauenwinkel wurden die narkotisierten Versuchstiere in Seitenlage gebracht. Danach wurde der Winkel zwischen der Klauensohle und der dorsalen Klauenwand mit einem Winkelmesser an allen 8 Klauen gemessen. Das Messen eines Klauenwinkels und die Positionierung des Klauenwinkelmessers werden in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 27: Messen der Klauenwinkel



Abbildung 28: Positionierung des Winkelmessers an der Klaue

3.2.6 Einsatz von Scoringssystemen

3.2.6.1 Bursa-Scoring

Mittels Palpation wurde das Auftreten von Hilfsschleimbeuteln (*Bursae auxiliares*) am narkotisierten Tier beurteilt und anschließend dokumentiert. Dabei wurden sowohl die Vordergliedmaßen als auch die Hintergliedmaßen untersucht.

3.2.6.2 Klauenbonitur-Scoring

Mittels Klauenboniturschema der „aid“ (Bonn, Deutschland) wurde die Beschaffenheit und Gesundheit aller Klauen am narkotisierten Schwein beurteilt. Dabei wurde die gesamte Klaue, der Kronsaum, das Wandhorn und der Sohlen- und Ballenbereich betrachtet. An der gesamten Klaue wurde auf folgende Merkmale geachtet: Unterentwicklung der Innenklauen (UI), überlange Klauen (ÜK), Hornbruch und überlange Afterklauen (ÜA) bzw. Afterklauenverletzungen (AV). Der Kronsaum wurde auf Kronsaumverletzungen (KSV) und Panaritien (P) untersucht. Am Wandhorn wurden Defekte, wie Wandhornabschürfungen (WHA), Lederhautblutungen (LHB), Hornrisse, Hornspalten und Hornrisse (HR) erfasst. Der Sohlen- und Ballenbereich wurde auf Sohlendefekte (SD), Ballenhorndefekte (BHD), Ballenhornwucherungen (BHW), Weiße-Linie-Defekte (WLD) und Zusammenhangstrennungen (ZSB) untersucht. Es wurde dokumentiert, ob es keine (Score 1), geringgradige (Score 2), mittelgradige (Score 3) oder hochgradige (Score 4) Befunde gab. Da in der Untersuchung überlange Klauen, überlange Afterklauen, Afterklauenverletzungen und Kronsaumverletzungen bzw. Panaritien nicht ausreichend vorkamen, wurden sie in der nachfolgenden Abbildung 29 nicht dargestellt.

Versuchstiere und Methoden















Merkmal	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4
Unterentwicklung Innenklaue (UI)	 ohne besonderen Befund	 geringgradig verkürzte Innenklaue	 mittelgradig verkürzte Innenklaue	 hochgradig verkürzte Innenklaue
Wandhornabschürfungen (WHA), Lederhautblutungen (LHB)	 ohne besonderen Befund	 geringgradige Abschürfungen	 Lederhautblutung	 hochgradige Abschürfung mit Blutung
Hornrisse (HR)	 ohne besonderen Befund	 geringgradige Hornrisse	 mittelgradiger Hornspalt	 hochgradige Hornspalten mit Entzündung
Sohlendefekte (SD), Ballenhorndefekte (BHD) und -wucherungen (BHW)	 ohne besonderen Befund	 geringgradige Wucherungen und Risse	 mittelgradige Wucherungen und Risse	 hochgradige Wucherungen und tiefe Risse
Zusammenhangstrennungen Sohle/Ballen (ZSB), Weiße-Linie-Defekt (WLD)	 ohne besonderen Befund	 geringgradiger Weiße-Linie-Defekt	 Langer Riss entlang der Weißen Linie	 Tiefer Riss im Übergang Sohle/Ballen

Abbildung 29: Bildliche Darstellung des Klauenboniturscorings

3.2.6.3 Lahmheitsscoring

Am auf die Untersuchungen mittels DXA und MRT folgenden Tag wurde das Gangbild mittels Lahmheitsscoring (modifiziert nach Main et. al., 2000) beurteilt durch die Vergabe von Scores (0-3). Score 0 steht für einen normalen Gang. Tiere mit dem Score 1 waren geringgradig lahm und zeigten eine Verkürzung der Schrittlänge und eine schlangenartige Bewegung der Wirbelsäule. Mittelgradig lahme Tiere (Score 2) belasteten eine Gliedmaße vermindert. Hochgradig lahme Tiere (Score 3) zeigten eine ausgeprägte Entlastung der betroffenen Gliedmaße oder waren nicht im Stande zu gehen. Das Schema nach dem das Gangbild beurteilt wurde, ist in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Gangbeurteilung, modifiziert nach Main et. al. (2000)

Score	Beobachtete Merkmale
0	Normaler Gang
1	Geringgradig lahm (Verkürzung der Schrittlänge, schlangenartige Bewegung der Wirbelsäule)
2	Mittelgradig lahm (verminderte Belastung einer Gliedmaße)
3	Hochgradig lahm (ausgeprägte Entlastung der betroffenen Gliedmaße oder nicht im Stande zu gehen)

3.3 Auswertung

3.3.1 Auswertung der MR-Bilder

Alle MR-Bilder wurden mit der Software 3D Doctor ® 4.0 (Able Inc., Lexington, MA, USA) ausgewertet. Mit dieser Software konnten Volumina und Abstände von den gewünschten anatomischen Strukturen berechnet werden. Für die Auswertung der Schultersequenz wurde zusätzlich die Software Synedra View Personal 16 (Innsbruck, Österreich) verwendet. Durch Verwendung der Software Synedra View Personal 16 wurde im Übersichtsbild der MR-Sequenz (Scout) die exakte Lokalisation der einzelnen MR-Schnitte (= MR- Bild) vereinfacht und dadurch die Auswertung der Knorpelvolumina und -dicken an derselben anatomischen Position für alle Tiere ermöglicht.

3.3.1.2 Schulter-, Ellbogensequenz

Um eine wiederholbare Auswertung der sagittalen MR- Sequenzen zu gewährleisten, wurde bei jedem Tier das MR- Bild von derselben anatomischen Position der linken Schulter ausgewertet. Dafür wurde mittels der Software Synedra View Personal 16 das MR-Bild, welches sich medial des linken Humeruskopfes befand, ausgewählt. Dabei wurde der Localizer entsprechend der Abbildung 30 im coronaren Übersichtsbild positioniert.

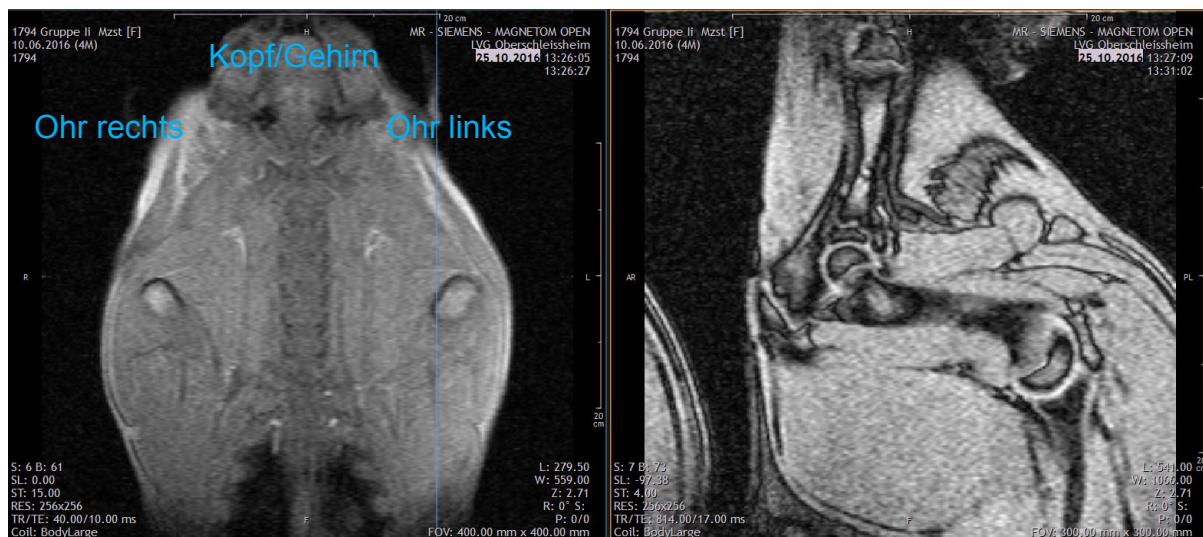


Abbildung 30: Darstellung des MR-Bildes medial des linken Humeruskopfes. Die blaue Linie im linken Bild kennzeichnet die Frontalebene (Ansicht von „unten“). Das rechte Bild zeigt die sogenannte Localizer-Aufnahme in der Frontalebene.

Danach wurde das MR-Bild (eine Schnittebene) mit der Software 3D Doctor® bearbeitet. Die Knorpel des Ellbogen- (blau) und Schultergelenks (orange) wurden manuell umrandet (siehe Abbildung 31), um die Knorpelscheiben in einer Ebene berechnen und als 3-D-Modell darzustellen zu können (siehe Abbildung 32). Danach erfolgte die Berechnung des Knorpelvolumens sowohl für das Ellbogen- als auch für das Schultergelenk.



Abbildung 31: Darstellung der untersuchten Knorpelscheiben mit 3D Doctor® (blau=Ellbogenknorpel; orange=Schulterknorpel; 1 = Radius; 2 = Condylus humeri; 3 = Corpus humeri; 4 = Caput humeri; 5 = Collum scapulae)



Abbildung 32: Dreidimensionale Darstellung des Ellbogenknorpels (blau) und Schulterknorpels (orange) durch die Software 3D Doctor®

Anschließend wurde der Durchmesser der Knorpelauflage im Ellbogen- und Schultergelenk mit Hilfe der Software 3D Doctor® bestimmt. Um die Erhebung der Dicken der Knorpelauflage wiederholbar zu machen, wurde immer in der Mitte der halbrunden Knorpelscheibe gemessen (siehe Abbildung 33 und 34).

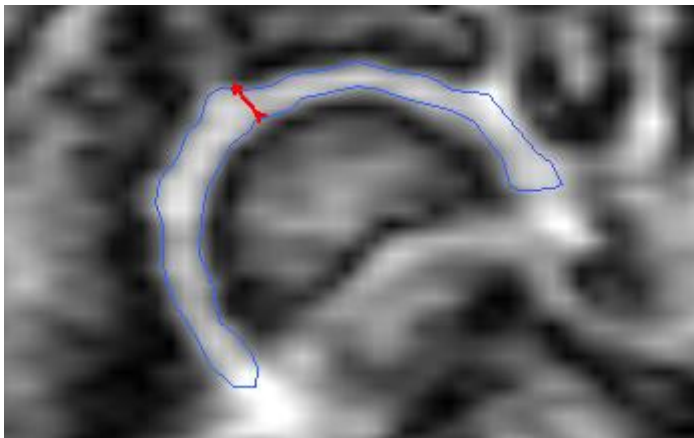


Abbildung 33: Darstellung der Messung des Durchmessers des Ellbogenknorpels

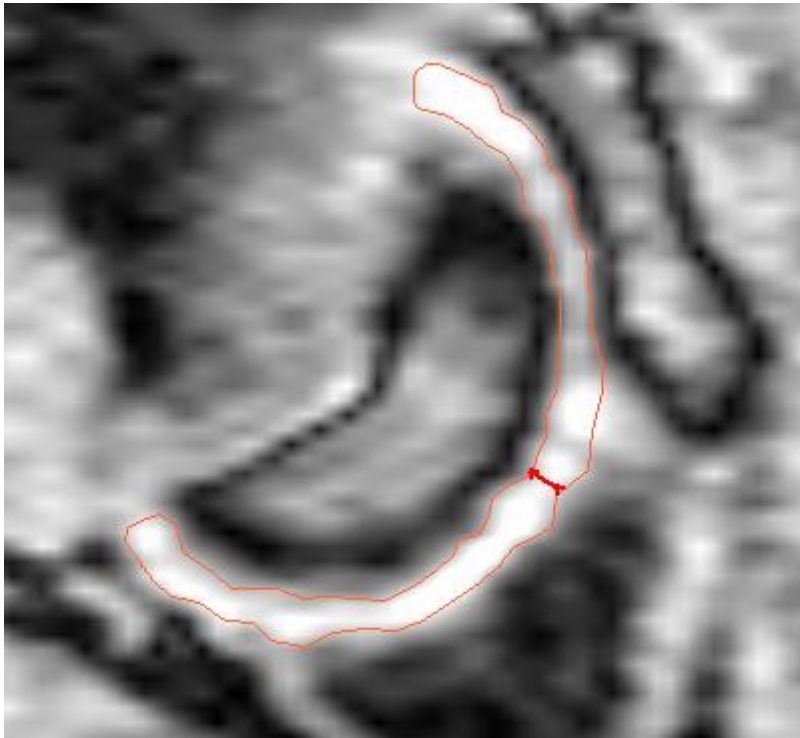


Abbildung 34: *Darstellung der Messung des Durchmessers des Schulterknorpels*

3.3.1.3 Kniesequenz

Die coronare MR-Sequenz beider Kniegelenke wurde ebenfalls mit der Software 3D Doctor® (Able Inc., Lexington, MA, USA) analysiert. Zuerst wurde die Kalibrierung der MR-Bilder überprüft. Es wurde darauf geachtet, dass beide Kniegelenke symmetrisch und vollständig dargestellt waren (Abbildungen 35 und 36). Die Bildvergrößerung und der Bildkontrast wurden so gewählt, dass das Knorpelgewebe gut vom umliegenden Gewebe abgrenzbar war. Es wurde jeweils der innere und äußere Knorpel des Femurkondylus im linken und rechten Kniegelenk manuell umrandet. Jedem Knorpel wurde eine Farbe zugeordnet, um die spätere Differenzierung zu erleichtern. Im nächsten Schritt wurden die Knorpel in einer Ebene berechnet und als 3-D-Modell dargestellt. Danach wurde das Volumen jedes einzelnen Knorpels bestimmt. Die Auswertung erfolgte somit analog zur Dissertation von Winkler (2017).

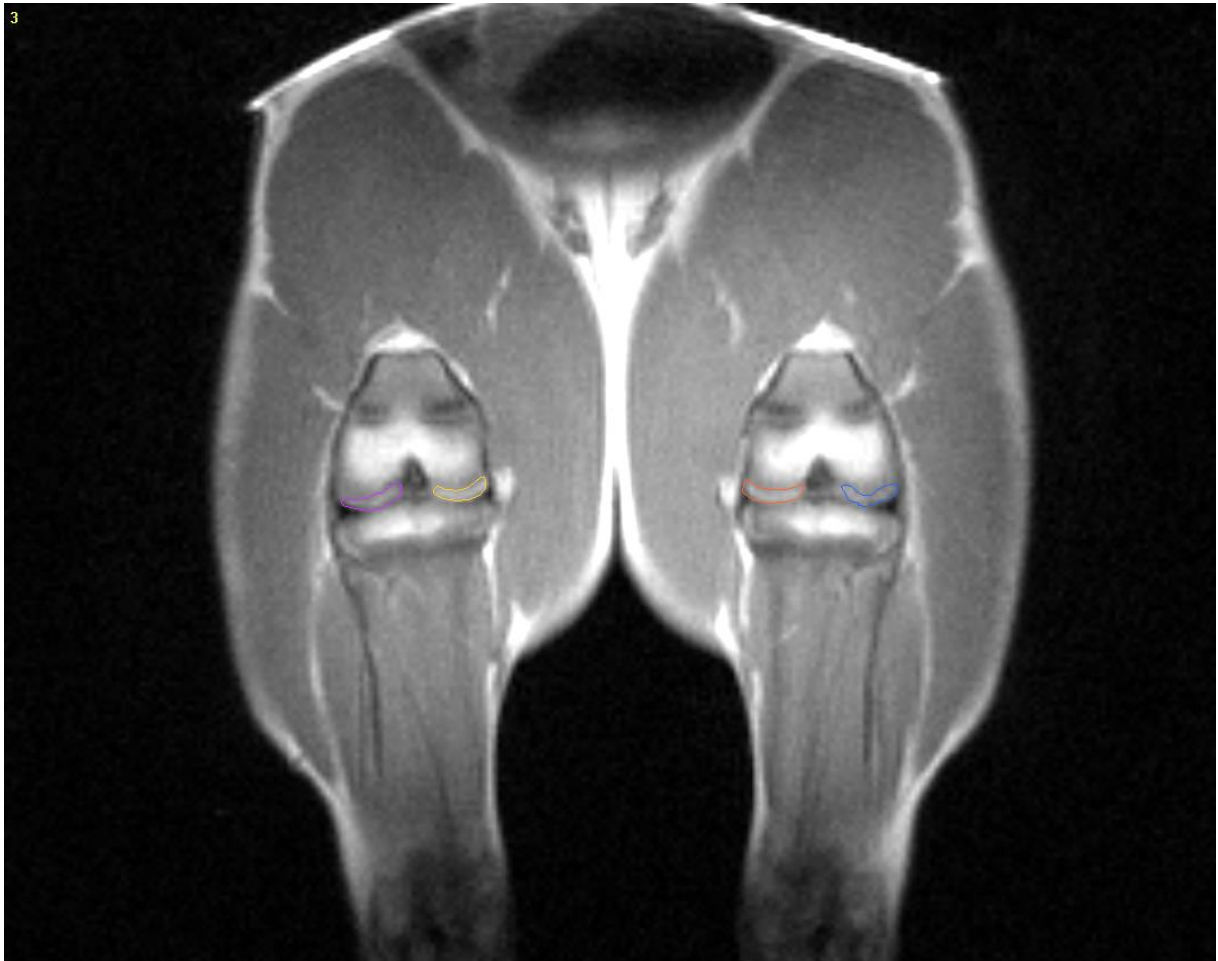


Abbildung 35: Darstellung der Knieknorpel mittels 3D-Doctor®

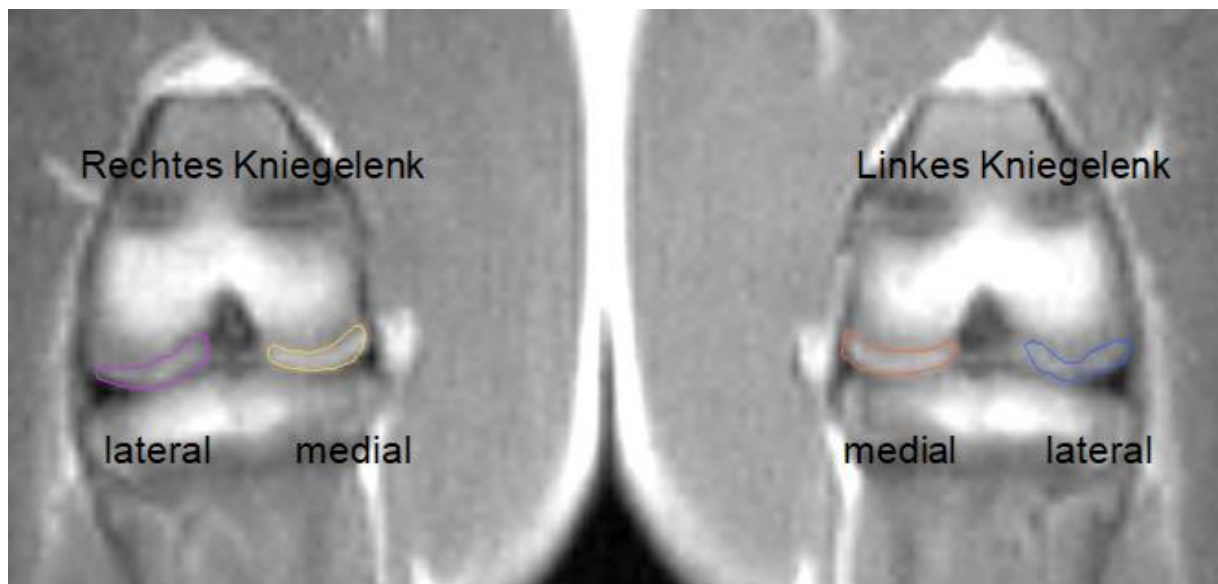


Abbildung 36: Ausschnitt aus der coronaren Kniesequenz mittels 3D-Doctor ®

3.3.2 Auswertung der DXA-Daten

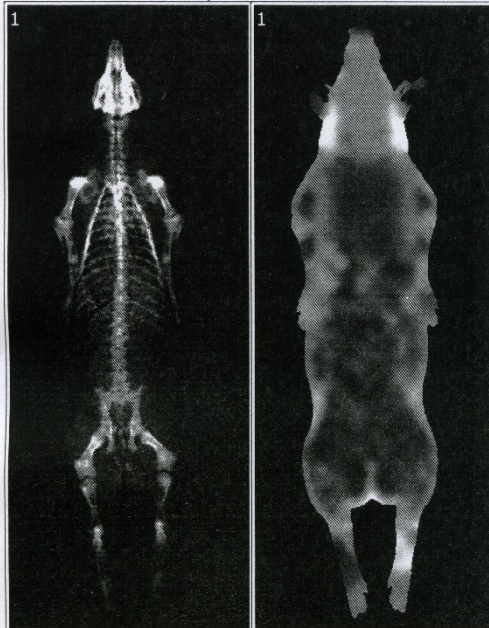
Im Anschluss an die Messung (mittels dem DXA-Scanner vom Typ GE Lunar iDXA) konnte direkt mithilfe der DXA Software „enCORE (Version 13.50)“ das erzeugte DXA-Bild des Ganzkörperscans benutzerspezifisch ausgewertet werden, indem eine Region of Interest (ROI) für den kompletten Tierkörper definiert wurde. Es wurde die Knochenmineraldichte [g/cm^2], der absolute Knochenmineralgehalt [g], die Projektionsfläche der Knochenmineralfläche [cm^2], der Fettgewebeanteil [%], das Weichgewebe [g], das Fettgewebe [g] und das Magerweichgewebe [g] des Tierkörpers bestimmt. In der nachfolgenden Abbildung 37 ist ein entsprechendes DXA-Protokoll mit den Messergebnissen für das komplette Tier dargestellt.

Lehr -und Versuchsgut Oberschleißheim

St. Hubertusstrasse 12
85764 Oberschleißheim

Patient:	1797, Klauenversuch Gruppe 2 Scan 2	Patientenkenennung:	
Geburtsdatum:	10.06.2016 4 Monate		
Größe / Gewicht:	150,0 cm 68,0 kg	Gemessen:	25.10.2016 10:59:55 (13,50)
Geschl. / Ethn.:	Männlich Weiß	Analysiert:	28.11.2017 15:16:12 (13,50)

Ganzkörper Custom Results



⁸ Bereich	BMD (g/cm ²)	BMC (g)	Fläche (cm ²)
1	0,749	1.279,3	1.709

⁸ Bereich	Gewebe (%Fett)	Gewebe (g)	Fett (g)	Mager (g)
1	12,6	66.917	8.449	58.469

Kommentare:

Bild nicht für Diagnosezwecke

Gedruckt: 28.11.2017 15:16:35 (13,50)100:0,19:153,85:15,6 0,00:-1,00
2,40x3,04 15,3:%Fett=12,4%
0,00:0,00 0,00:0,00
Dateiname: k2lfo4atb.meb
Scanmodus: Standard 3,0 µGy

⁸ -Die individuellen Ergebnisse sind nur für Forschungszwecke, nicht für den klinischen Einsatz bestimmt.

WARNUNG - Untersuchungsgerät. Durch Bundesgesetze auf
Untersuchungszwecke beschränkt.



GE Healthcare

Lunar iDXA
ME+200639

Abbildung 37: Messergebnisse aus der DXA-Analyse mit benutzerspezifischer Definition der Regions of Interest (hier Bereich 1 = Ganzkörper)

3.3.3 Auswertung der Klauenwinkelmessung

Die Werte der Klauenwinkel wurden in eine Excel-Tabelle zur späteren statistischen Auswertung übertragen.

3.3.4 Auswertung der Scoring-Daten

Die Scores der Bursen, Lahmheits- und Klauenbonituruntersuchung wurden ebenfalls in eine Excel-Tabelle übertragen.

3.3.5 Statistische Analyse der Ergebnisse (statistische Modelle)

Die statistische Auswertung aller erhobenen Merkmale erfolgte mittels SAS 9.3 (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA). Für die DXA-Merkmale, MRT- und Klauenwinkeldaten kam eine Mischmodellanalyse mittels REML (restricted maximum likelihood) zur Anwendung (fixe Effekte = Haltungssystem, Gruppe, Geschlecht; Zufallseffekt = Mutter). Signifikante Unterschiede wurden jeweils bei $p \leq 0,05$ angenommen. Eine Häufigkeitsanalyse unter Verwendung eines χ^2 - bzw. Fisher-Exakt-Testes (bei $n < 5$ innerhalb eines Scores) diente der Analyse der Bursen-, Lahmheits- und Klauenboniturdaten.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Auswertung der MRT-Bilder

4.1.1 Schulter- und Ellbogensequenz

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Einflüsse des Haltungssystems (Tabelle 22), der Gruppe (Tabelle 23) und des Geschlechtes (Tabelle 24) auf das Knorpelvolumen und den Knorpeldurchmesser im Schulter- und Ellbogengelenk.

In Bezug auf das Haltungssystem (Tabelle 22) zeigten sich lediglich bei Scan 30 signifikante Unterschiede zwischen Außenklimastall und Mehrzweckstall für den Durchmesser der Knorpelauflage im Schultergelenk (DMK_Schulter), den Durchmesser der Knorpelauflage im Ellbogengelenk (DMK_Ellbogen) und das Knorpelvolumen des Ellbogengelenks (KV_Ellbogen). Dabei zeigten unerwartet Tiere, die in den MZST eingestallt wurden, signifikant höhere Knorpeldurchmesser bzw. Knorpelvolumina.

Tabelle 22: Knorpelvolumina im Schulter- bzw. Ellbogengelenk und Durchmesser der Knorpelauflage in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	AKS	MZST	p-Wert
KV_Schulter [mm³]	30	421 \pm 15	460 \pm 15	> 0,05
	60	569 \pm 23	603 \pm 24	> 0,05
	90	614 \pm 22	616 \pm 23	> 0,05
KV_Ellbogen [mm³]	30	305 \pm 10	361 \pm 10	0,0001
	60	439 \pm 17	450 \pm 19	> 0,05
	90	538 \pm 23	512 \pm 23	> 0,05
DMK_Schulter [mm]	30	3,0 \pm 0,1	3,3 \pm 0,1	0,049
	60	3,3 \pm 0,1	3,3 \pm 0,1	> 0,05
	90	3,1 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	> 0,05
DMK_Ellbogen [mm]	30	2,7 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1	0,009
	60	2,9 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1	> 0,05
	90	3,1 \pm 0,1	2,8 \pm 0,1	> 0,05

KV = Knorpelvolumen,

DMK = Durchmesser Knorpelauflage

Ergebnisse

Innerhalb der verschiedenen Gruppen (Tabelle 23) wurden signifikante Unterschiede im KV_Ellbogen, DMK_Schulter und DMK_Ellbogen zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90 deutlich. Die Gruppe 1 hatte die höchsten Werte bezüglich des KV- Ellbogen, DMK_Schulter und DMK_Ellbogen. Außerdem wurden signifikante Unterschiede des KV_Schulter beim Scan 30 deutlich.

Tabelle 23: Knorpelvolumina im Schulter- und Ellbogengelenk und Durchmesser der Knorpelauflage in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE)

Variable	Scan	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	p- Wert
KV_Schulter [mm ³]	30	409 ± 18^a	479 ± 18^b	434 ± 18^{ab}	0,0268
	60	630 ± 26	591 ± 30	538 ± 29	>0,05
	90	698 ± 25	528 ± 29	619 ± 284	> 0,05
KV_Ellbogen [mm ³]	30	336 ± 12	345 ± 13	318 ± 12	> 0,05
	60	485 ± 20^a	403 ± 23^b	445 ± 25^{ab}	0,0295
	90	652 ± 25^a	413 ± 31^b	510 ± 28^c	<0,0001
DMK_Schulter [mm]	30	3,1 ± 0,1	3,3 ± 0,1	3,0 ± 0,1	> 0,05
	60	3,5 ± 0,1^a	3,4 ± 0,1^a	2,9 ± 0,1^b	0,0024
	90	3,6 ± 0,1^a	2,9 ± 0,1^b	2,9 ± 0,1^b	<0,0001
DMK_Ellbogen [mm]	30	2,7 ± 0,1	3,0 ± 0,1	2,7 ± 0,1	> 0,05
	60	3,2 ± 0,1^a	2,7 ± 0,1^b	2,8 ± 0,1^b	0,0047
	90	3,5 ± 0,1^a	2,5 ± 0,2^b	2,9 ± 0,2^b	0,0003

LSM mit unterschiedlichen Superskripts in einer Zeile unterscheiden sich signifikant (p<0,05).

KV = Knorpelvolumen;

DMK = Durchmesser Knorpelauflage;

Ergebnisse

Bei der Untersuchung des Einflusses des Geschlechtes (Tabelle 24) wurde sichtbar, dass es sowohl beim KV_Schulter zum Zeitpunkt des Scan 60, als auch beim DMK_Ellbogen am Scan 30 signifikante Unterschiede gab.

Tabelle 24: Knorpelvolumina im Schulter- und Ellenbogengelenk und Durchmesser der Knorpelauflage in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	Mn	Wb	p- Wert
KV_Schulter [mm³]	30	441 \pm 15	440 \pm 15	> 0,05
	60	619 \pm 23	553 \pm 23	0,0457
	90	636 \pm 23	594 \pm 22	> 0,05
KV_Ellbogen [mm³]	30	335 \pm 10	331 \pm 10	> 0,05
	60	433 \pm 18	456 \pm 19	> 0,05
	90	542 \pm 23	508 \pm 22	> 0,05
DMK_Schulter [mm]	30	3,1 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	> 0,05
	60	3,4 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	> 0,05
	90	3,1 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1	> 0,05
DMK_Ellbogen [mm]	30	2,7 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1	0,0091
	60	2,9 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1	> 0,05
	90	2,9 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1	> 0,05

KV = Knorpelvolumen

DMK = Durchmesser Knorpelauflage

Mn = männlich

Wb = weiblich

4.1.2 Kniesequenz

Zwischen den verschiedenen Haltungssystemen gab es bezüglich des KV_FK_li (Knorpelvolumen Femurkondylus links innen), KV_FK_la (Knorpelvolumen Femurkondylus links außen), KV_FK_ri (Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen), KV_FK_ra (Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen) keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 25).

Tabelle 25: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	AKS	MZST	p- Wert
KV_FK_li [mm ³]	30	1829 \pm 61	1796 \pm 63	> 0,05
	60	1099 \pm 42	1034 \pm 44	> 0,05
	90	920 \pm 42	989 \pm 43	> 0,05
KV_FK_la [mm ³]	30	1632 \pm 53	1635 \pm 55	> 0,05
	60	933 \pm 39	981 \pm 40	> 0,05
	90	868 \pm 37	869 \pm 39	> 0,05
KV_FK_ri [mm ³]	30	1751 \pm 59	1677 \pm 61	> 0,05
	60	1087 \pm 36	1083 \pm 37	> 0,05
	90	988 \pm 42	953 \pm 44	> 0,05
KV_FK_ra [mm ³]	30	1777 \pm 52	1755 \pm 54	> 0,05
	60	1029 \pm 38	1019 \pm 39	> 0,05
	90	937 \pm 46	932 \pm 47	> 0,05

KV_FK_li = Knorpelvolumen Femurkondylus links innen
 KV_FK_la = Knorpelvolumen Femurkondylus links außen
 KV_FK_ri = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen
 KV_FK_ra = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen

Ergebnisse

Bezüglich des KV_FK_la und des KV_FK_ri gab es signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen bei Scan 90. Gruppe 1 hatte dabei die größten Werte (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	p- Wert
KV_FK_li [mm ³]	30	1774 \pm 90	1983 \pm 92	1681 \pm 97	> 0,05
	60	1037 \pm 50	1053 \pm 57	1112 \pm 53	> 0,05
	90	1070 \pm 50	890 \pm 59	903 \pm 55	> 0,05
KV_FK_la [mm ³]	30	1636 \pm 75	1671 \pm 78	1593 \pm 80	> 0,05
	60	956 \pm 46	904 \pm 51	1012 \pm 47	> 0,05
	90	1029 \pm 41^a	763 \pm 51^b	813 \pm 48^{ab}	<0,0001
KV_FK_ri [mm ³]	30	1623 \pm 82	1872 \pm 85	1647 \pm 87	> 0,05
	60	1074 \pm 42	1051 \pm 48	1130 \pm 45	> 0,05
	90	1166 \pm 55^a	921 \pm 63^b	825 \pm 60^{ab}	0,0049
KV_FK_ra [mm ³]	30	1767 \pm 72	1880 \pm 75	1651 \pm 76	> 0,05
	60	1034 \pm 45	957 \pm 50	1081 \pm 47	> 0,05
	90	1078 \pm 65	873 \pm 72	851 \pm 72	> 0,05

LSM mit unterschiedlichen Superskripts in einer Zeile unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$).

KV_FK_li = Knorpelvolumen Femurkondylus links innen
KV_FK_la = Knorpelvolumen Femurkondylus links außen
KV_FK_ri = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen
KV_FK_ra = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen

Ergebnisse

Zwischen den Geschlechtern wurden im KV_FK_ri sowohl am Scan 30 als auch am Scan 60 signifikante Unterschiede deutlich. Außerdem gab es signifikante Unterschiede für KV_FK_la zum Zeitpunkt des Scan 60. Die männlich kastrierten Schweine haben tendenziell ein größeres Knorpelvolumen als die weiblichen Tiere (Tabelle 27).

Tabelle 27: Knorpelvolumina im Kniegelenk in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	Mn	Wb	p- Wert
KV_FK_li [mm³]	30	1839 \pm 63	1786 \pm 63	> 0,05
	60	1101 \pm 44	1034 \pm 42	> 0,05
	90	975 \pm 43	934 \pm 42	> 0,05
KV_FK_la [mm³]	30	1661 \pm 55	1606 \pm 55	> 0,05
	60	1014 \pm 40	900 \pm 39	0,0433
	90	875 \pm 38	861 \pm 38	> 0,05
KV_FK_ri [mm³]	30	1823 \pm 60	1605 \pm 60	0,0027
	60	1149 \pm 37	1021 \pm 36	0,0150
	90	994 \pm 44	948 \pm 43	> 0,05
KV_FK_ra [mm³]	30	1810 \pm 54	1722 \pm 54	> 0,05
	60	1066 \pm 39	982 \pm 38	> 0,05
	90	934 \pm 47	934 \pm 46	> 0,05

KV_FK_li = Knorpelvolumen Femurkondylus links innen
KV_FK_la = Knorpelvolumen Femurkondylus links außen
KV_FK_ri = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen
KV_FK_ra = Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen

Ergebnisse

Die drei nachfolgenden Tabellen stellen die Reduktion (Abbau) des Knorpelvolumens im Kniegelenk zwischen der ersten Untersuchung (Scan 30) und der letzten Untersuchung (Scan 90) dar.

Das Haltungssystem zeigte keinen signifikanten Einfluss auf den Abbau der Knorpelvolumina am Knie (KV_Abbau_FK_li = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links innen, K_Abbau_FK_la = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links außen, K_Abbau_FK_ri = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts innen, K_Abbau_FK_ra = Knorpelabbau Femurkondylus rechts außen) (Tabelle 28).

Tabelle 28: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM \pm SEE)

Variable	AKS	MZST	p- Wert
KV_Abbau_FK_li [mm ³]	904 \pm 67	841 \pm 73	> 0,05
KV_Abbau_FK_la [mm ³]	783 \pm 62	811 \pm 67	> 0,05
KV_Abbau_FK_ri [mm ³]	764 \pm 65	675 \pm 71	> 0,05
KV_Abbau_FK_ra [mm ³]	866 \pm 64	840 \pm 69	> 0,05

KV_Abbau_FK_li = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links innen
KV_Abbau_FK_la = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links außen
KV_Abbau_FK_ri = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts innen
KV_Abbau_FK_ra = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts außen

Ergebnisse

In Bezug auf die Gruppe zeigten sich bei allen Variablen (KV_Abbau_FK_li, KV_Abbau_FK_la, KV_Abbau_FK_ri, KV_Abbau_FK_ra) signifikante Unterschiede. Der geringste Knorpelabbau wurde bei Gruppe 1 ersichtlich (Tabelle 29).

Tabelle 29: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM \pm SEE)

Variable	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	p- Wert
KV_Abbau_FK_li [mm³]	680 \pm 76^a	1153 \pm 97^b	786 \pm 84^a	0,0009
KV_Abbau_FK_la [mm³]	609 \pm 68^a	946 \pm 91^b	837 \pm 80^b	0,0085
KV_Abbau_FK_ri [mm³]	470 \pm 74^a	875 \pm 96^b	813 \pm 82^b	0,0011
KV_Abbau_FK_ra [mm³]	698 \pm 73^a	1002 \pm 94^b	859 \pm 79^{ab}	0,0374

LSM mit unterschiedlichen Superskripts in einer Zeile unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$).

KV_Abbau_FK_li = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links innen
 KV_Abbau_FK_la = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links außen
 KV_Abbau_FK_ri = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts innen
 KV_Abbau_FK_ra = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts außen

Zwischen den Geschlechtern zeigten sich bei der Variablen KV_Abbau_FK_ri signifikante Unterschiede. Die Reduktion des Knorpels (Knorpelabbau) ist bei den männlich kastrierten Tieren tendenziell größer als bei den weiblichen Schweinen (Tabelle 30).

Ergebnisse

Tabelle 30: Knorpelvolumenabbau im Kniegelenk zwischen Scan 30 und Scan 90 in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)

Variable	Mn	Wb	p- Wert
KV_Abbau_FK_li [mm ³]	892 ± 68	853 ± 71	> 0,05
KV_Abbau_FK_la [mm ³]	826 ± 63	768 ± 65	> 0,05
KV_Abbau_FK_ri [mm ³]	820 ± 67	619 ± 69	0,0386
KV_Abbau_FK_ra [mm ³]	900 ± 65	806 ± 68	> 0,05

KV_Abbau_FK_li = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links innen
 KV_Abbau_FK_la = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus links außen
 KV_Abbau_FK_ri = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts innen
 KV_Abbau_FK_ra = Knorpelvolumenabbau Femurkondylus rechts außen

4.2 Ergebnisse der Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

Bezüglich des Haltungssystems gab es für BMD (Knochenmineraldichte) an allen drei Untersuchungstagen signifikante Unterschiede. Schweine im AKS besitzen eine signifikant höhere BMD als im MZST. Beim BMC (Knochenmineralgehalt) zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Haltungssystemen zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90 (Tabelle 31).

Tabelle 31: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	AKS	MZST	p- Wert
BMD [g/cm ²]	30	0,563 \pm 0,007	0,543 \pm 0,007	0,0382
	60	0,905 \pm 0,008	0,816 \pm 0,008	< 0,0001
	90	1,095 \pm 0,009	1,010 \pm 0,010	< 0,0001
BMC [g]	30	560,76 \pm 10,98	536,28 \pm 11,08	> 0,05
	60	1501,10 \pm 24,07	1344,79 \pm 25,13	< 0,0001
	90	2149,23 \pm 35,32	1947,24 \pm 36,59	< 0,0001
Fett_PC [% Fett]	30	7,89 \pm 0,15	7,95 \pm 0,16	> 0,05
	60	12,72 \pm 0,23	12,53 \pm 0,24	> 0,05
	90	16,75 \pm 0,29	16,76 \pm 0,30	> 0,05
Fett [g]	30	2305 \pm 73	2322 \pm 73	> 0,05
	60	9144 \pm 281	8693 \pm 293	> 0,05
	90	16857 \pm 456	16572 \pm 475	> 0,05
Mager [g]	30	26638 \pm 478	26657 \pm 482	> 0,05
	60	61745 \pm 946	59267 \pm 988	> 0,05
	90	81988 \pm 1101	80655 \pm 1144	> 0,05
DXA-Gewicht [kg]	30	29,504 \pm 0,547	29,515 \pm 0,552	> 0,05
	60	72,390 \pm 1,217	69,305 \pm 1,270	> 0,05
	90	101,010 \pm 1,413	99,136 \pm 1,473	> 0,05

BMD = Knochenmineraldichte

BMC = Knochenmineralgehalt

Fett_PC = prozentualer Fettanteil

Fett = Fettgehalt

Mager = Magerfleischgehalt

Zwischen den Gruppen gab es signifikante Unterschiede für BMD an allen drei Scanzeitpunkten. Gruppe 2 zeigte bei allen Scans die niedrigsten BMD-Werte. Bezüglich des BMC wurden signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90 deutlich. Gruppe 2 zeigte ebenfalls beim BMC die niedrigsten

Ergebnisse

Werte. Für Fett_PC (Prozentualer Fettgehalt) wurden signifikante Unterschiede beim Scan 90 sichtbar. Gruppe 2 hatte den geringsten Fett_PC. Außerdem zeigten sich signifikante Unterschiede im Fettgehalt zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90. Gruppe 2 hatte den niedrigsten Fettgehalt. Zwischen den 3 Gruppen gab es signifikante Unterschiede bezüglich des Magerweichgewebegehaltes beim Scan 60 und Scan 90. Gruppe 2 zeigte die niedrigste Magerweichgewebemasse (g). Desweiterem wurden signifikante Unterschiede hinsichtlich des DXA-Gewichtes sichtbar während Scan 60 und Scan 90, wobei Gruppe 2 das niedrigste Gewicht aufwies (Tabelle 32).

Tabelle 32: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE)

Variable	Scan	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	p- Wert
BMD [g/cm ²]	30	0,568 ± 0,009^a	0,514 ± 0,009^b	0,577 ± 0,009^{ab}	0,0027
	60	0,886 ± 0,010^a	0,816 ± 0,011^b	0,878 ± 0,010^a	<0,0001
	90	1,088 ± 0,011^a	0,957 ± 0,013^b	1,113 ± 0,012^a	<0,0001
BMC [g]	30	569,23 ± 13,40	526,64 ± 13,58	549,68 ± 13,56	> 0,05
	60	1465,92 ± 28,42^a	1354,18 ± 32,65^b	1448,72 ± 29,47^a	0,0281
	90	2076,32 ± 46,44^a	1867,23 ± 52,11^b	2201,15 ± 50,64^{ab}	0,0023
Fett_PC [% Fett]	30	7,96 ± 0,19	7,67 ± 0,19	8,13 ± 0,19	> 0,05
	60	13,12 ± 0,27	12,18 ± 0,31	12,5 ± 0,28	> 0,05
	90	16,91 ± 0,33^a	14,92 ± 0,39^b	18,424 ± 0,36^c	<0,0001
Fett [g]	30	2375 ± 89	2226 ± 90	2340 ± 90	> 0,05
	60	9766 ± 331^a	7972 ± 380^b	9017 ± 343^a	0,0025
	90	16904 ± 528^a	13774 ± 616^b	19465^c ± 569^c	<0,0001
Mager [g]	30	27270 ± 583	26442 ± 591	26230 ± 590	> 0,05
	60	63557 ± 1117^a	56889 ± 1283^b	61071 ± 1159^a	0,0007
	90	82199 ± 1404^a	77392 ± 1591^b	84373 ± 1526^a	0,0233
DXA- Gewicht [kg]	30	30,214 ± 0,667	29,195 ± 0,676	29,120 ± 0,675	> 0,05
	60	74,790 ± 1,436^a	66,2159 ± 1,650^b	71,537 ± 1,490^a	0,0007
	90	101,180 ± 1,642^a	93,056 ± 1,915^b	105,980 ± 1,771^a	0,0012

LSM mit unterschiedlichen Superskripts in einer Zeile unterscheiden sich signifikant (p<0,05).

BMD = Knochenmineraldichte
 BMC = Knochenmineralgehalt
 Fett_PC = prozentualer Fettanteil
 Fett = Fettgehalt
 Mager = Magerfleischgehalt

Ergebnisse

Bei Berücksichtigung des Geschlechtes zeigten sich signifikante Unterschiede in Bezug auf den Fettanteil (%), Fettgehalt (g), Magerfleischgehalt (g) und das DXA-Gewicht (kg) jeweils zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90. Bei all diesen Parametern hatten die männlichen Tiere die größeren Werte (Tabelle 33).

Tabelle 33: Körperzusammensetzung in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)

Variable	Scan	Mn	Wb	p- Wert
BMD [g/cm²]	30	0,553 ± 0,007	0,553 ± 0,007	> 0,05
	60	0,869 ± 0,008	0,851 ± 0,008	> 0,05
	90	1,062 ± 0,010	1,043 ± 0,009	> 0,05
BMC [g]	30	553,88 ± 11,17	543,15 ± 10,91	> 0,05
	60	1453,35 ± 25,12	1392,53 ± 24,09	> 0,05
	90	2088,59 ± 36,98	2007,88 ± 35,04	> 0,05
Fett_PC [% Fett]	30	8,01 ± 0,16	7,82 ± 0,15	> 0,05
	60	13,86 ± 0,24	11,40 ± 0,23	< 0,0001
	90	18,56 ± 0,30	14,95 ± 0,28	<0,0001
Fett [g]	30	2369 ± 74	2258 ± 72	> 0,05
	60	10143 ± 293	7694 ± 281	< 0,0001
	90	19277 ± 480	14152 ± 452	< 0,0001
Mager [g]	30	26970 ± 486	26325 ± 474	> 0,05
	60	62070 ± 987	58941 ± 947	0,0238
	90	83270 ± 1156	79373 ± 1092	0,0072
DXA- Gewicht [kg]	30	29,892 ± 0,556	29,127 ± 0,543	> 0,05
	60	73,667 ± 1,270	68,028 ± 1,218	0,0017
	90	104,65 ± 1,488	95,496 ± 1,401	<0,0001

BMD = Knochenmineraldichte

BMC = Knochenmineralgehalt

Fett_PC = prozentualer Fettanteil

Fett = Fettgehalt

Mager = Magerfleischgehalt

4.3 Beziehungen zwischen DXA- und MRT-Ergebnissen

Im Verlauf der Untersuchung kommt es mit steigendem Alter bzw. Gewicht bei allen Tieren, egal welchen Geschlechts, zu einer Abnahme des Knorpelvolumens im Bereich des Knies. Dieser Zusammenhang ist in der nachfolgenden Abbildung 38 dargestellt.

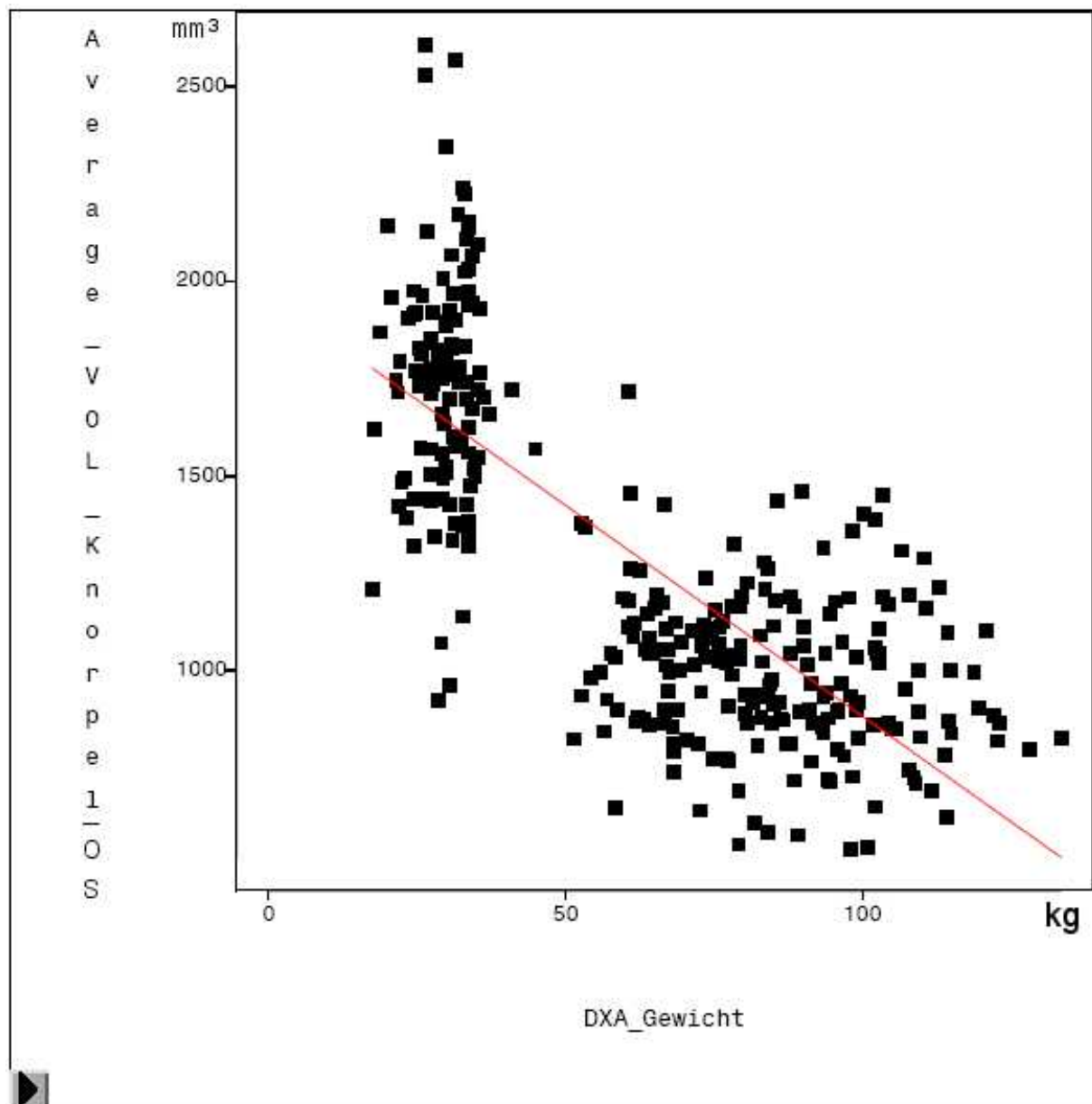


Abbildung 38: Beziehung zwischen durchschnittlichem Knorpelvolumen am Knie und dem Untersuchungsgewicht (DXA-Gewicht); Adj R-Sq 0.58, Root MSE = 281 mm^3

Ergebnisse

Außerdem wurde eine Abnahme des Knorpelvolumens an den Femurkondylen mit steigender Knochenmineraldichte (BMD) beobachtet (Abb. 39)

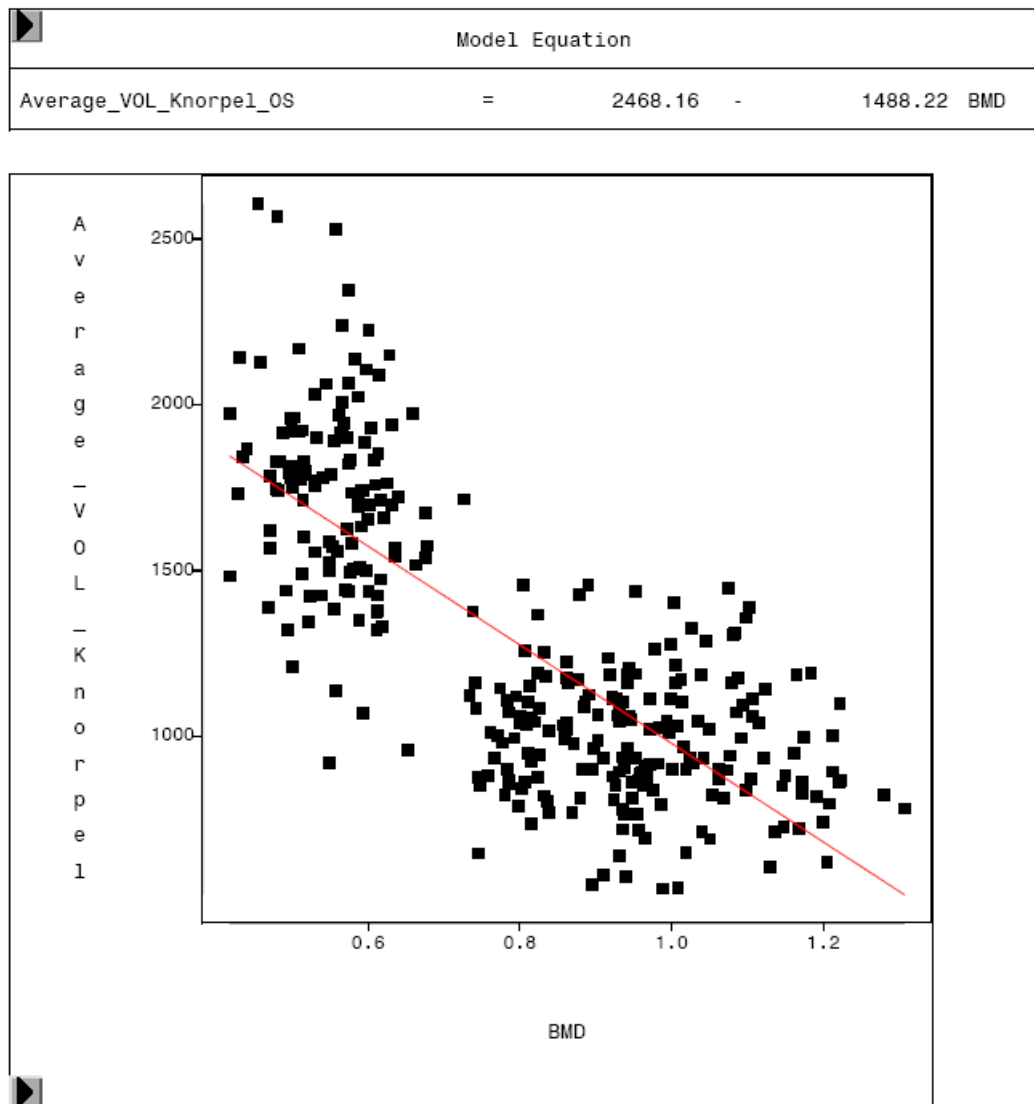


Abbildung 39: Graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Knorpelvolumen an den Femurkondylen im Kniegelenk in mm^3 und der Ganzkörper-Knochenmineraldichte in g/cm^2 (BMD)

4.4 Ergebnisse der Untersuchung der Klauenwinkel

Signifikante Unterschiede in Bezug auf das Haltungssystem (Tabelle 34) wurden bei den Variablen KW_VLa und KW_VRa bei Scan 60 und Scan 90 sichtbar. Am KW_VLi und KW_VRi wurden signifikante Unterschiede nur bei Scan 60 deutlich. Die Tiere im MZST hatten die größten Klauenwinkel an den Klauen der Vordergliedmaßen.

Bei allen vier Klauen an den Hintergliedmaßen zeigten sich bezüglich des Haltungssystems signifikante Unterschiede in der Größe der Klauenwinkel zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90, wobei die Tiere im MZST die größeren Klauenwinkel aufzeigten (Tabelle 34).

Tabelle 34: Klauenwinkel in Abhängigkeit vom Haltungssystem (LSM \pm SEE)

Variable	Scan	AKS	MZST	p- Wert
KW_VLi [°]	30	50,5 \pm 0,5	50,9 \pm 0,5	> 0,05
	60	54,2 \pm 0,3	55,2 \pm 0,3	0,0311
	90	55,6 \pm 0,4	56,1 \pm 0,4	> 0,05
KW_VLa [°]	30	52,4 \pm 0,5	52,8 \pm 0,5	> 0,05
	60	56,5 \pm 0,4	58,6 \pm 0,4	0,0003
	90	58,0 \pm 0,4	60,1 \pm 0,4	0,0002
KW_VRi [°]	30	49,6 \pm 0,4	49,3 \pm 0,4	> 0,05
	60	55,0 \pm 0,3	56,5 \pm 0,4	0,0039
	90	57,0 \pm 0,4	57,3 \pm 0,4	> 0,05
KW_VRa [°]	30	53,5 \pm 0,4	52,7 \pm 0,4	> 0,05
	60	56,0 \pm 0,4	58,9 \pm 0,4	< 0,0001
	90	58,0 \pm 0,4	59,8 \pm 0,4	0,0013
KW_HLi [°]	30	48,0 \pm 0,5	48,3 \pm 0,5	> 0,05
	60	54,0 \pm 0,4	55,2 \pm 0,4	0,0239
	90	55,5 \pm 0,4	57,2 \pm 0,4	0,0061
KW_HLa [°]	30	49,8 \pm 0,6	50,0 \pm 0,6	> 0,05
	60	56,2 \pm 0,4	57,9 \pm 0,4	0,0016
	90	57,6 \pm 0,5	60,4 \pm 0,5	< 0,0001
KW_HRi [°]	30	46,5 \pm 0,5	47,5 \pm 0,5	> 0,05
	60	54,3 \pm 0,4	55,8 \pm 0,4	0,0040
	90	55,5 \pm 0,5	57,2 \pm 0,5	0,0059
KW_HRa [°]	30	50,0 \pm 0,4	50,5 \pm 0,4	> 0,05
	60	56,0 \pm 0,4	58,6 \pm 0,4	< 0,0001
	90	57,4 \pm 0,5	60,2 \pm 0,5	< 0,0001

KW_VLi = Klauenwinkel vorne links innen
KW_VLa = Klauenwinkel vorne links außen
KW_VRi = Klauenwinkel vorne rechts innen

Ergebnisse

KW_VRa = Klauenwinkel vorne rechts außen
 KW_HLi = Klauenwinkel hinten links innen
 KW_HLa = Klauenwinkel hinten links außen
 KW_HRi = Klauenwinkel hinten rechts innen
 KW_HRa = Klauenwinkel hinten rechts außen

In Tabelle 35 wurde der Einfluss der Gruppe auf die Klauenwinkel dargestellt. Bei den Variablen KW_VLi, KW_VRi und KW_HLi zeigten sich signifikante Unterschiede am Scan 90. Für den KW_VRa und den KW_HRi wurden signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt des Scan 30 sichtbar. Der KW_VLa zeigte signifikante Unterschiede bei Scan 30 und Scan 90 sowie der KW_HLa bei Scan 60. Bei dem KW_HRa zeigten sich signifikante Unterschiede am Scan 30 und Scan 60.

Tabelle 35: Klauenwinkel in Abhängigkeit von der Gruppe (LSM ± SEE)

Variable	Scan	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	p-Wert
KW_VLi [°]	30	49,8 ± 0,8	51,2 ± 0,8	51,0 ± 0,8	> 0,05
	60	54,3 ± 0,4	54,7 ± 0,4	55,1 ± 0,4	> 0,05
	90	54,2 ± 0,4^a	56,9 ± 0,6^b	56,5 ± 0,5^b	0,0001
KW_VLa [°]	30	50,3 ± 0,7^a	54,6 ± 0,7^b	53,0 ± 0,8^b	0,005
	60	58,0 ± 0,4	57,8 ± 0,5	56,9 ± 0,5	> 0,05
	90	57,9 ± 0,4^a	59,4 ± 0,6^b	59,7 ± 0,5^b	0,0134
KW_VRi [°]	30	49,0 ± 0,6	50,4 ± 0,6	49,0 ± 0,6	> 0,05
	60	55,1 ± 0,4	56,3 ± 0,5	55,7 ± 0,4	> 0,05
	90	55,5 ± 0,5^a	58,0 ± 0,6^b	58,0 ± 0,5^b	0,0056
KW_VRa [°]	30	51,4 ± 0,5^a	55,6 ± 0,5^b	52,4 ± 0,5^a	<0,0001
	60	58,0 ± 0,5	57,7 ± 0,6	56,7 ± 0,5	> 0,05
	90	58,0 ± 0,4	59,5 ± 0,6	59,1 ± 0,5	> 0,05
KW_HLi [°]	30	48,5 ± 0,6	49,1 ± 0,6	46,8 ± 0,6	> 0,05
	60	54,8 ± 0,4	54,5 ± 0,5	54,5 ± 0,5	> 0,05
	90	54,3 ± 0,5^a	56,9 ± 0,6^b	57,7 ± 0,5^b	< 0,0001
KW_HLa [°]	30	49,2 ± 0,9	51,8 ± 0,9	48,7 ± 0,9	> 0,05
	60	58,4 ± 0,5^a	56,3 ± 0,6^b	56,4 ± 0,6^{ab}	0,0358
	90	57,6 ± 0,6	59,2 ± 0,7	60,2 ± 0,7	> 0,05
KW_HRi [°]	30	47,6 ± 0,6^a	47,9 ± 0,6^a	45,5 ± 0,6^b	0,0457
	60	55,1 ± 0,5	55,0 ± 0,6	55,0 ± 0,5	> 0,05
	90	54,9 ± 0,7	56,9 ± 0,8	57,1 ± 0,7	> 0,05
KW_HRa [°]	30	49,4 ± 0,5^a	52,5 ± 0,5^b	49,0 ± 0,5^a	< 0,0001
	60	58,8 ± 0,5^a	56,2 ± 0,6^b	56,8 ± 0,5^b	0,0011
	90	57,8 ± 0,7	59,5 ± 0,8	59,1 ± 0,7	> 0,05

LSM mit unterschiedlichen Superskripts in einer Zeile unterscheiden sich signifikant (p<0,05).

Ergebnisse

KW_VLi = Klauenwinkel vorne links innen
 KW_VLa = Klauenwinkel vorne links außen
 KW_VRi = Klauenwinkel vorne rechts innen
 KW_VRa = Klauenwinkel vorne rechts außen
 KW_HLi = Klauenwinkel hinten links innen
 KW_HLa = Klauenwinkel hinten links außen
 KW_HRi = Klauenwinkel hinten rechts innen
 KW_HRa = Klauenwinkel hinten rechts außen

In Bezug auf das Geschlecht wurden signifikante Unterschiede allein bei KW_VRi am Scan 60 sichtbar (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36: Klauenwinkel in Abhängigkeit vom Geschlecht (LSM ± SEE)

Variable	Scan	Mn	Wb	p- Wert
KW_VLi [°]	30	50,3 ± 0,5	51,0 ± 0,5	> 0,05
	60	54,8 ± 0,3	54,6 ± 0,3	> 0,05
	90	55,9 ± 0,4	55,8 ± 0,4	> 0,05
KW_VLa [°]	30	52,7 ± 0,5	52,5 ± 0,5	> 0,05
	60	57,6 ± 0,4	57,5 ± 0,4	> 0,05
	90	58,9 ± 0,4	59,1 ± 0,4	> 0,05
KW_VRi [°]	30	49,4 ± 0,4	49,5 ± 0,4	> 0,05
	60	56,4 ± 0,4	55,0 ± 0,3	0,0081
	90	57,4 ± 0,4	56,9 ± 0,4	> 0,05
KW_VRa [°]	30	53,2 ± 0,4	53,1 ± 0,4	> 0,05
	60	57,9 ± 0,4	57,0 ± 0,4	> 0,05
	90	59,2 ± 0,4	58,6 ± 0,4	> 0,05
KW_HLi [°]	30	48,3 ± 0,5	47,9 ± 0,5	> 0,05
	60	54,5 ± 0,4	54,7 ± 0,4	> 0,05
	90	56,5 ± 0,5	56,1 ± 0,4	> 0,05
KW_HLa [°]	30	50,2 ± 0,6	49,6 ± 0,6	> 0,05
	60	57,0 ± 0,4	57,1 ± 0,4	> 0,05
	90	59,4 ± 0,5	58,6 ± 0,5	> 0,05
KW_HRi [°]	30	47,3 ± 0,5	46,7 ± 0,5	> 0,05
	60	55,4 ± 0,4	54,7 ± 0,4	> 0,05
	90	56,4 ± 0,5	56,3 ± 0,5	> 0,05
KW_HRa [°]	30	50,5 ± 0,4	50,1 ± 0,4	> 0,05
	60	57,6 ± 0,4	57,0 ± 0,4	> 0,05
	90	59,2 ± 0,5	58,3 ± 0,5	> 0,05

KW_VLi = Klauenwinkel vorne links innen;
 KW_VLa = Klauenwinkel vorne links außen;
 KW_VRi = Klauenwinkel vorne rechts innen;
 KW_VRa = Klauenwinkel vorne rechts außen;
 KW_HLi = Klauenwinkel hinten links innen;

Ergebnisse

KW_HLa = Klauenwinkel hinten links außen;
KW_HRi = Klauenwinkel hinten rechts innen;
KW_HRa = Klauenwinkel hinten rechts außen

4.5 Ergebnisse der Scorings

4.5.1 Lahmheits-Scoring

Bei Scan 30 haben alle Tiere im AKS und MZST einen Score 0. Signifikante Unterschiede in Bezug auf das Haltungssystem zeigten sich bei Scan 60. Die Schweine im MZST haben häufiger Score 1 und Score 2 zum Zeitpunkt des Scan 60 und tendenziell bei Scan 90.

Tabelle 37: Häufigkeitsverteilung (%) der Lahmheits-Scores 0-3 in Abhängigkeit vom Haltungssystem

Scan	AKS				MZST				p- Wert
	Score				Score				
	0	1	2	3	0	1	2	3	
30	100				100				
60	76,67	23,33			60,71	32,14	7,14		0,0457
90	59,32	32,20	8,47		43,64	40,00	16,36		0,1943

4.5.2 Bursa-Scoring

Signifikante Unterschiede bezüglich der Häufigkeit des Auftretens von Bursen in den verschiedenen Haltungssystemen zeigten sich bei Scan 60 und Scan 90. Die Tiere im MZST hatten signifikant häufiger Bursen als die Tiere im AKS (Tabelle 38).

Tabelle 38: Häufigkeitsverteilung (%) des Vorkommens von Bursen in Abhängigkeit vom Haltungssystem

Scan	AKS		MZST		p- Wert
	Ja	Nein	Ja	Nein	
30	7,81	92,19	6,35	93,65	0,7480
60	6,67	93,33	66,07	33,93	< 0,0001
90	1,69	98,31	67,27	32,73	< 0,0001

4.5.3 Klauenbonitur-Scoring

Bei Betrachtung der „Unterentwicklung der Innenklaue“ (UI) zeigten sich signifikante Unterschiede bezüglich des Haltungssystems bei Scan 60 an den Klauen des rechten und linken Hinterbeins. Die Schweine im AKS zeigten die höheren Scorewerte bei diesem Merkmal. Gleichzeitig wurden leicht „Überlange Klauen“ signifikant häufiger im AKS an der rechten und linken Hintergliedmaße

Ergebnisse

bei Scan 60 sowie an den Klauen der linken Hintergliedmaße zum Zeitpunkt des Scan 90 festgestellt. Überlange Afterklauen kamen während des gesamten Untersuchungszeitraumes bei keinem einzelnen Schwein vor. Daher wurde dieses Merkmal in der Tabelle 39 nicht aufgeführt. Signifikante Unterschiede beim Merkmal Lederhautblutungen traten zum Zeitpunkt des Scan 90 an den Klauen der rechten Vorder- und Hintergliedmaße auf. Die Tiere im AKS hatten signifikant mehr Scores 2 beim Merkmal Lederhautblutungen. Außerdem zeigten sich signifikante Unterschiede bei der Untersuchung der Klauen auf Hornrisse zum Zeitpunkt des Scan 60 an den Klauen der linken und rechten Hintergliedmaße sowie während des Scan 90 an den Klauen aller vier Gliedmaßen. Die Schweine im Außenklimastall hatten weniger Hornrisse. Bei den Sohlendefekten traten signifikante Unterschiede an den Klauen der linken und rechten Vordergliedmaße zum Zeitpunkt des Scan 90 auf. Somit traten vermehrt Hornrisse bei den Schweinen im MZST auf. Außerdem zeigten sich signifikante Unterschiede bei dem Merkmal der Zusammenhangstrennung zwischen Sohle und Ballen an den Klauen der Vordergliedmaße zum Zeitpunkt des Scan 60 mit einem Vorteil für die Schweine AKS.

Ergebnisse

Tabelle 39: Häufigkeitsverteilung (%) des Vorkommens verschiedener Klauenboniturmerkmale in Abhängigkeit vom Haltungssystem

Variable	Scan	Lokalisation		AKS				MZST				p- Wert
Score				1	2	3	4	1	2	3	4	
UI	30	V	links	25,00	75,00			39,68	60,32			0,0768
			rechts	50,00	50,00			38,10	61,90			0,1767
		H	links	1,56	95,31	1,56	1,56	1,59	93,65	4,76	0,00	0,5671
			rechts		96,88	3,13		1,59	92,06	6,35		0,4082
	60	V	links	5,00	88,33	6,67		10,71	89,29			0,0839
			rechts	30,00	68,33	1,67		28,57	71,43			0,6086
		H	links		33,33	63,33	3,33		57,14	41,07	1,79	0,0358
			rechts		28,33	68,33	3,33	7,14	48,21	44,64		0,0073
	90	V	links	3,39	94,92	1,69		5,45	81,82	9,09	3,64	0,1150
			rechts	3,39	94,92	1,69		14,55	80,00	5,45		0,0522
		H	Links		22,03	76,27	1,69		25,45	74,55		0,5816
			rechts		22,03	77,97			14,55	81,82	3,64	0,2160
ÜK	30	V	links	100				100				
			rechts	100				100				
		H	links	100				98,41	1,59			0,3116
			rechts	100				98,41	1,59			0,3116
	60	V	links	100				100				
			rechts	98,33	1,67			100				0,3319
		H	links	88,33	11,67			100				0,0084
			rechts	86,67	13,33			100				0,0046
	90	V	links	94,92	5,08			98,18	1,82			0,3436
			rechts	94,92	5,08			98,18	1,82			0,3436
		H	links	93,22	6,78			100				0,0493
			rechts	91,53	8,47			96,36	3,64			0,2823
KSV	30	V	links	100				100				
			rechts	100				100				
		H	links	100				100				
			rechts	100				100				
	60	V	links	100				98,21	1,79			0,2985
			rechts	98,33	1,67			100				0,3319
		H	links	100				98,21	1,79			0,2985
			rechts	100				98,21			1,79	0,2985
	90	V	links	100				100				
			rechts	100				100				
		H	links	100				100				
			rechts	100				98,18	1,82			0,2982
WHA bzw. LHB	30	V	links	89,06	10,94			80,95	19,05			0,2001
			rechts	92,19	7,81			85,71	14,29			0,2442
		H	links	82,81	15,63	1,56		92,06	7,94	0,00		0,2364
			rechts	82,81	17,19			88,89	11,11			0,3263
	60	V	links	60,00	40,00			66,07	33,93			0,4987
			rechts	68,33	30,00		1,67	71,43	28,57			0,6086
		H	links	60,00	38,33	1,67		62,50	35,71	1,79		0,9581
			rechts	60,00	40,00			53,57	42,86		3,57	0,2996
	90	V	links	61,02	33,90	5,08		76,36	21,82	1,82		0,1896
			rechts	57,63	42,37			76,36	16,36	7,27		0,0022
		H	links	59,32	40,68			72,73	25,45		1,82	0,1474
			rechts	52,54	45,76		1,69	74,55	25,45			0,0412

Ergebnisse

Fortsetzung Tabelle 39: Häufigkeitsverteilung (%) des Vorkommens verschiedener Klauenboniturmerkmale in Abhängigkeit vom Haltungssystem

Variable	Scan	Lokalisation		AKS				MZST				p- Wert
Score				1	2	3	4	1	2	3	4	
HR	30	V	links	78,13	21,88			76,19	23,81			0,7951
			rechts	79,69	20,31			79,37	20,63			0,9641
		H	links	78,13	21,88			88,89	11,11			0,1026
			rechts	81,25	18,75			82,54	17,46			0,8503
	60	V	links	51,67	45,00	3,33		44,64	41,07	12,50	1,79	0,2028
			rechts	46,67	45,00	6,67	1,67	39,29	50,00	10,71		0,5719
		H	links	55,00	38,33	6,67		19,64	67,86	12,50		0,0005
			rechts	48,33	33,33	16,67	1,67	23,21	64,29	7,14	5,36	0,0028
	90	V	links	52,54	42,37		5,08	38,18	49,09	10,91	1,82	0,0311
			rechts	42,37	40,68	13,56	3,39	21,82	52,73	25,45		0,0360
		H	links	55,93	40,68	3,39		20,00	65,45	12,73	1,82	0,0007
			rechts	59,32	25,42	13,56	1,69	16,36	58,18	21,82	3,64	<0,0001
SD	30	V	links	34,38	65,63			33,33	65,08	1,59		0,5982
			rechts	32,81	65,63	1,56		25,40	73,02	1,59		0,6539
		H	links	42,19	57,81			42,86	55,56	1,59		0,5922
			rechts	39,06	60,94			49,21	50,79			0,2497
	60	V	links	55,00	40,00	5,00		33,93	57,14	5,36	3,57	0,0792
			rechts	45,00	48,33	6,67		26,79	62,50	8,93	1,79	0,1740
		H	links	41,67	56,67	1,67		39,29	60,71			0,5901
			rechts	45,00	48,33	6,67		26,79	69,64	3,57		0,0661
	90	V	links	45,76	47,46	6,78		20,00	60,00	14,55	5,45	0,0100
			rechts	37,29	45,76	13,56	3,39	9,09	70,91	16,36	3,64	0,0050
		H	links	38,98	50,85	8,47	1,69	20,00	74,55	5,45		0,0627
			rechts	28,81	57,63	10,17	3,39	25,45	58,18	16,36		0,4212
ZSB bzw. WLD	30	V	links	93,75	6,25			88,89	11,11			0,3302
			rechts	95,31	3,13	1,56		90,48	9,52			0,2093
		H	links	92,19	7,81			88,89	11,11			0,5252
			rechts	87,50	12,50			88,89	11,11			0,8084
	60	V	links	66,67	25,00	8,33		41,07	44,64	10,71	3,57	0,0286
			rechts	35,00	55,00	8,33	1,67	32,14	53,57	12,50	1,79	0,9033
		H	Links	43,33	53,33	1,67	1,67	42,86	57,14			0,5840
			rechts	38,33	53,33	8,33		39,29	60,71			0,0841
	90	V	links	35,59	52,54	6,78	5,08	29,09	54,55	9,09	7,27	0,8479
			rechts	27,12	54,24	13,56	5,08	23,64	49,09	21,82	5,45	0,7066
		H	links	22,03	66,10	8,47	3,39	25,45	63,64	9,09	1,82	0,9304
			rechts	22,03	64,41	11,86	1,69	14,55	78,18	5,45	1,82	0,3975

UI = Unterentwicklung der Innenklauen

ÜK = Überlange Klauen

KSV = Kronsaumverletzungen

WHA bzw. LHB = Wandhornabschürfungen bzw. Lederhautblutungen

HR = Hornrisse

SD = Sohlendefekte

ZSB bzw. WLD = Zusammenhangstrennungen Sohle/Ballen bzw. Weiße-Linie-Defekte

V = vorne

H = hinten

5 Diskussion

5.1 Diskussion Versuchstiere und Versuchsaufbau

Die Rassen Piétrain und Deutsche Landrasse werden in der Schweinezucht zur Produktion von Hybridmastschweinen eingesetzt. Daher wurde diese Kreuzung für den Versuch ausgewählt um für den Mastschweine-Sektor aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Durch einheitliche Genetik (Verwendung von Masthybriden aus Piétrain x Deutsche Landrasse, Verwendung von Halb- und Vollgeschwistern in jedem Untersuchungsdurchgang) und einheitliche Fütterung wurde versucht diese Faktoren als Einflussgröße weitgehend auszuschließen. Es wurde allen Versuchsschweinen das gleiche konventionelle Alleinfuttermittel aus eigener Herstellung in Form von Pellets gefüttert. Um den Einfluss des Vaters der Versuchsschweine besser untersuchen zu können, wäre ein größerer Stichprobenumfang und eine mehrfache Verwendung derselben Eber zum Vergleich nötig gewesen. Insgesamt wurden die Versuchstiere möglichst gleichmäßig in Bezug auf das Geschlecht auf die zwei Haltungssysteme aufgeteilt, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Alle Versuchstiere wurden in auf den Tag genauen Abständen gescannt, damit sie eine ähnliche Körperkondition haben und die Daten besser vergleichbar sind. Für weitere Versuche wären größere Tiergruppen und auch die Untersuchung von weiteren Haltungssystemen (z.B. Freilandhaltung) interessant.

5.2 Diskussion der MRT-Daten

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es möglich ist Knorpelgewebe im Bereich des Schulter-, Ellbogen- und Kniegelenkes mittel MRT darzustellen und die Knorpelvolumina nach dem verwendeten Schema zu bestimmen. Dies war durchführbar sowohl für die sagittale Schultersequenz als auch für die Kniesequenz mit coronarer Ausrichtung.

Das Knorpelgewebe konnte in den MR-Bildern sowohl am Knie, als auch an Schulter bzw. Ellbogen leicht vom umliegenden Gewebe abgegrenzt werden. Auch bei Maataoui et al. (2010) wird beschrieben, dass sich die anatomischen Strukturen im Gelenk wie Menisken, Synovia-Gewebe, Bänder und insbesondere Knorpel, sehr gut mittels MRT darstellen und beurteilen lassen. Aber um die Genauigkeit der verwendeten Methode zum Auswerten der Knorpelvolumina validieren zu können, wäre eine pathologische Untersuchung nötig gewesen. Diese wäre mit einer Tötung einhergegangen. Eine pathologische Untersuchung wäre zudem mit relativ hohen Kosten und zusätzlichem Arbeitsaufwand verbunden gewesen. Außerdem sollte in dieser Studie ein Hauptaugenmerk auf die Anwendung von nicht-invasiven Verfahren während des Wachstums gelegt werden. Alle in der Studie verwendeten Schweine wurden nach dem Scan 90 nach Ablauf der Wartezeit geschlachtet und für den menschlichen Verzehr vermarktet.

Bei der sagittalen Sequenz von Schulter- und Ellbogenbereich wurde eine Schichtdicke von 4 mm und bei der coronaren Kniesequenz eine Schichtdicke von 15 mm verwendet. Nach Maataoui et al. (2010) scheint die Wahl der Schichtdicke keinen großen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Bestimmung von Knorpelvolumina (beim Menschen) zu haben. Die Knorpelvolumenmessung unter Verwendung der Schichtdicke von 1,5 mm lieferte keine größere Genauigkeit als eine Knorpelvolumenmessung in 5 mm Schnitten.

Um zu validieren, ob die Schichtdicke in der vorliegenden Studie auch keinen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Knorpelvolumina-Messwerte hat, hätten von einer Untersuchungsregion jeweils mehrere Sequenzen mit verschiedenen Schichtdicken angefertigt werden müssen. Die Verwendung größerer Schichtdicken hat den Vorteil, dass weniger MR-Bilder erzeugt und

ausgewertet werden müssen. Dies führt zu einer schnelleren Auswertung der Bilddaten. Die vorliegende Studie bestätigt zudem, dass sich die Methode der Magnetresonanztomographie sehr gut als nicht-invasive Untersuchungsmethode beim Schwein eignet, da sie eine funktionelle, multiplanare (3D) Bildgebungsmethode mit sehr guter Weichgewebedifferenzierung ohne Strahlungsbelastung darstellt (Scholz et al., 2016). Von Nachteil ist, dass die Versuchsschweine sowohl für die Untersuchung mittels MRT als auch für die DXA-Untersuchung in Narkose gelegt werden müssen. Dies stellt eine geringgradige Belastung für die Tiere und eine zusätzliche Kostenquelle dar. Außerdem ist deshalb nur die Verwendung von kurzen Sequenzen möglich. Ein weiterer Nachteil ist die relativ teure Anschaffung und Wartung des MRT-Gerätes und die nicht ganz so leichte Bedienung durch den Untersucher. Erfahrung, Routine und technisches Wissen über die Funktionsweise des MRTs sind nötig, damit „gerade“ positionierte und gut auswertbare MR-Bilder erzeugt werden. Eine stabile Positionierung des Versuchstieres ist notwendig damit keine Bewegungsartefakte im Bild entstehen. Hinzu kommt die eingeschränkte Verfügbarkeit von MRT-Geräten zur Untersuchung von Nutztieren, die relativ hohen Investitionskosten und die variable Dichte von Fett-, Muskelgewebe sowie Organen (Scholz et al., 2016). Außerdem nimmt die Auswertung der hohen Anzahl an MR-Bilder viel Zeit in Anspruch. Das manuelle Umranden der Knorpel mittels der Software 3D Doctor® verlangt dem Untersucher ein erhebliches Maß an Konzentration ab, wodurch es theoretisch möglich sein kann, dass Fehler und Ungenauigkeiten entstehen. Außerdem müssen alle Bilder von derselben Person auf ihr Knorpelvolumen untersucht werden, damit eine hohe Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit entsteht. Daher hat dieses Verfahren im Rahmen der Bildauswertung eine nicht zu vernachlässigende subjektive Komponente.

5.2.1 Schulter-, Ellbogensequenz

5.2.1.1 Einfluss Haltungssystem

Signifikante Unterschiede in Bezug auf das Haltungssystem traten unerwartet beim Knorpelvolumen am Ellbogengelenk (KV_Ellbogen), beim Durchmesser der Knorpelaufgabe am Schultergelenk (DMK_Schulter) und beim Durchmesser

der Knorpelauflage am Ellbogengelenk (DMK_Ellbogen) zum Zeitpunkt des Scan 30 auf. Die Tiere im MZST haben in allen drei Variablen die signifikant höheren Werte (siehe Tabelle 22). Auffällig und nicht exakt erklärbar ist, dass diese signifikanten Unterschiede lediglich bei Scan 30 auftraten, da die Versuchstiere zufällig ausgewählt und zufällig auf die einzelnen Haltungssysteme verteilt wurden. Alle Versuchsschweine waren zu Beginn der Studie gleich schwer. Außerdem spricht das Auftreten von signifikanten Unterschieden lediglich zum Zeitpunkt des Scan 30 dafür, dass es sich um ein zufälliges Phänomen handeln dürfte, da die Schweine erst nach dem Scan 30 in die zu untersuchenden Haltungssysteme eingestallt wurden. Wenn Haltungssystem bedingte Unterschiede aufgetreten wären, hätten diese sich zum Zeitpunkt des Scan 60 oder Scan 90 zeigen müssen. Laut Literatur scheint das Haltungssystem einen Einfluss auf die Ausprägung und Form von Knorpeln in den verschiedenen Gelenken zu haben, auch wenn dies in der vorliegenden durchgeführten Studie nicht nachgewiesen werden konnte. In einer Studie von van Grevenhof et al. (2011) waren Schweine, welche auf Vollspaltenboden gehalten wurden, von Knorpelveränderungen im Ellbogen- und Sprunggelenk in Form von Osteochondrose signifikant häufiger betroffen als Schweine aus einem Tiefstreuhaltungssystem. In einer Studie von Etterlin et al. (2014) zeigten hingegen mehr Schweine Osteochondrose an den Ellbogengelenken in einem Freilandhaltungssystem im Vergleich zu den Schweinen im konventionellen Stallhaltungssystem (69% vs. 50%; $p < 0,05$).

5.2.1.2 Einfluss Gruppe

Der Untersuchungszeitraum (Gruppe) scheint ebenfalls einen Einfluss auf das Knorpelvolumen zu haben. Signifikante Unterschiede sind bei den Variablen KV_Ellbogen, DMK_Schulter und DMK_Ellbogen zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90 zu beobachten (siehe Tabelle 23). Dabei fällt auf, dass die Tiere der Gruppe 1 immer die höchsten Werte zeigen. Da alle Tiere einer Gruppe denselben Vater hatten, könnte dies ein Indiz dafür sein, dass der Eber in dieser Studie einen Einfluss auf die Ausprägung des Knorpels und der Fundamentgesundheit seiner Nachkommen hatte. In der Literatur finden sich Hinweise auf einen genetischen Einfluss auf die Ausprägung und die

pathologischen Veränderungen im Knorpelgewebe verschiedener Gelenke. Ekman und Carlson (1998) kamen zum Schluss, dass Osteochondrose ätiologisch durch genetische Faktoren, neben Traumata, schnellem Wachstum, nutritiven Faktoren und Ischämie bedingt ist. Laut Fukawa und Kusuhara (2001) ist Osteochondrose und Beinschwäche nur in einem geringen bis mittleren Ausmaß vererbbar (Vorderbeine = $h^2 = 0,28 \pm 0,11$; Hinterbeine = $h^2 = 0,38 \pm 0,11$). In einer Studie von Draper et al. (1992) wurden schwere Osteochondrose-Läsionen gefunden, aber es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen untersuchten Duroc-Linien. Außerdem ist in der Literatur beschrieben, dass Knorpelveränderungen in Form von Osteochondrose bei Duroc x Piétrain Kreuzungstieren an den Vordergliedmaßen weniger häufig vorkommen (Laenoi et al., 2011). Daher könnte es sein, dass der Knorpel an den Vordergliedmaßen weniger von Abbauvorgängen betroffen ist, ein anderes Wachstumsmuster aufweist und anderen Belastungen ausgesetzt ist im Vergleich zum Knorpel an der Hintergliedmaße.

5.2.1.3 Einfluss Geschlecht

Signifikante Unterschiede in Bezug auf das Geschlecht traten lediglich bei der Variablen KV_Schulter zum Zeitpunkt des Scan 60 auf mit einem höheren Knorpelvolumen der männlich kastrierten Tiere und beim DMK_Ellbogen zum Zeitpunkt des Scan 30 mit einem höheren Knorpeldurchmesser der weiblichen Tiere (siehe Tabelle 24). Diese Ergebnisse lassen keine eindeutige Erklärung zu. Auch in der Literatur gibt es sehr kontroverse Ergebnisse in Bezug auf Geschlechtsdifferenzen von Knorpelveränderungen. In einer Studie von van Grevenhof et al. (2011) sind Eber häufiger von Osteochondrose betroffen. Dagegen war in einer Studie von Etterlin et al. (2014) eine höhere Prävalenz von Osteochondrose auf der lateralen Seite des Ellbogengelenkes bei Jungsaunen sichtbar. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass in der vorliegenden Studie lediglich das Knorpelvolumen bestimmt wurde und keines der Versuchstiere auf Osteochondrose untersucht wurde.

5.2.2 Kniesequenz

5.2.2.1 Einfluss Haltungssystem

In Bezug auf das Haltungssystem traten keinerlei signifikante Unterschiede im Volumen der Knorpelauflage an den Femurkondylen auf (siehe Tabelle 25). Damit scheint das Haltungssystem in dieser Studie keinen Einfluss auf das Knorpelvolumen im Kniegelenk zu haben. In der Literatur sind einige Studien veröffentlicht worden, die Unterschiede in der Konformation von Gelenkknorpel in verschiedenen Haltungssystemen aufzeigen. In einer Studie von Etterlin et al. (2014) zeigten Schweine in Freilandhaltung im Vergleich zu Schweinen aus konventioneller Innenhaltung eine höhere Prävalenz von Osteochondrose in den Sprunggelenken (83% vs. 62%; $p < 0,05$). Das erhöhte Risiko für die Schweine in Freilandhaltung an Osteochondrose zu erkranken, könnte durch einen erhöhten biomechanischen Stress auf gefährdete Gelenkstrukturen bedingt sein (Etterlin et al., 2014). Daher ist bei der Freilandhaltung von Schweinen die Modifizierung des Haltungssystems und die Zucht von Schweinen, bei denen die Gelenke besser an die Belastungen im Freiland angepasst sind, von großer Bedeutung (Etterlin et al., 2014).

Gleichzeitig sind *ad-libitum* gefütterte Schweine im Gegensatz zu rationiert gefütterten Schweine signifikant häufiger von Osteochondrose in den Sprunggelenken betroffen (van Grevenhof et al., 2011). Bei Schweinen auf Vollspaltenboden mit *ad-libitum* Fütterung betrug die Prävalenz für Osteochondrose 57,5%. Schweine, die auf Tiefstreu gehalten werden, mehr Platz zur Verfügung hatten und restriktiv gefüttert werden, wiesen eine Prävalenz von 33,7% auf (van Grevenhof et al. 2011). Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Haltungssystem und die Haltungsumwelt eine Rolle bei der Entstehung von Knorpeldefekten (wie Osteochondrose) und Knorpelverschleiß spielen können. Aber dies konnte in der vorliegenden Untersuchung bei der Untersuchung der Knorpelvolumina nicht bestätigt werden. Wie bereits erwähnt, wurde das Vorhandensein von Osteochondrose an keinem Schwein dieser Studie untersucht. Für die Untersuchung von Osteochondrose wäre ein stärkerer Magnet mit einer größeren Feldstärke (T) notwendig gewesen. Selbst in einer Studie von Tóth et al. (2013) war es nicht

möglich mittels eines Hochfeld-MRTs die kleinen avaskulären Bereiche im Knorpel darzustellen und zu identifizieren. Da in der vorliegenden Studie ein Niederfeld-MRT mit 0,2 T verwendet wurde, ist die Auflösung der gewonnenen Bilder noch niedriger.

5.2.2.2 Einfluss Gruppe

In Assoziation mit dem Einfluss der Gruppe zeigten sich signifikante Unterschiede lediglich bei den Variablen KV_FK_la (= Knorpelvolumen Femurkondylus links außen), KV_FK_ri (= Knorpelvolumen Femurkondylus rechts innen) und KV_FK_ra (=Knorpelvolumen Femurkondylus rechts außen) zum Zeitpunkt des Scan 90 (siehe Tabelle 26). Aber bei Betrachtung des Knorpelabbaus (= Differenz-Knorpelvolumina zwischen 1. und 3. Scan) ergaben sich signifikante Unterschiede für alle vier Variablen (KV_Abbau_FK_li, KV_Abbau_FK_la, KV_Abbau_FK_ri, KV_Abbau_FK_ra) (siehe Tabelle 29). Die Tiere in Gruppe 2 haben die signifikant höchsten Knorpelverluste an allen vier Knorpeln. Dagegen haben die Tiere in Gruppe 1 die niedrigsten Knorpelverluste. Die Knorpelverluste von Gruppe 3 liegen zwischen den Werten von Gruppe 1 und Gruppe 2. Diese Ergebnisse scheinen zu zeigen, dass der Knorpelverlust durch genetische Faktoren bestimmt ist, da alle Tiere einer Gruppe denselben Vater der Rasse Piétrain hatten (Gruppe 1= Borussia, Gruppe 2 = Romul, Gruppe 3 = Ringol). Es ist wichtig nochmals darauf hinzuweisen, dass ein Knorpelverlust nicht mit Knorpeldefekten gleichgesetzt werden darf. Es ist ein physiologischer Vorgang, der bewirkt, dass mit zunehmenden Alter der Tiere die Knorpeldicke und Durchblutungsrate abnimmt (Nakano et al., 1987).

In der Literatur wird beschrieben, dass die Zucht und Selektion auf schnellwachsende Tiere die Inzidenz eines Knorpelschwundes in Form von Osteochondrose erhöht (Ekman und Carlson, 1998; MacGavin und Zachary, 2011) und somit scheint auch eine genetische Komponente Einfluss auf die Ausprägung von Knorpelgewebe zu haben. Nakano et al. (1987) bringen ebenfalls das schnelle Wachstum der Schweine mit der erhöhten Inzidenz von Osteochondrose in Verbindung. Jørgensen und Andersen (2000) beobachteten die höchste Prävalenz für Osteochondrose an den Femurkondylen mit einer

Heritabilität von 0,32 bei der Rasse Yorkshire und 0,31 bei der Dänischen Landrasse. Nach van Steenbergen (1989) korreliert Osteochondrose mit dem Exterieur des Tieres. Die Stellung der Gliedmaßen und eine Gangbeurteilung können als Indikator für Osteochondrose zur Auswahl von Zuchttieren verwendet werden, da ein steifer Gang und schaukelnde Beckenbewegungen Hinweise auf Osteochondrose an der Hintergliedmaße sein können (Koning et al., 2012). Auch das Vorkommen von IgM- und IgG-Antikörpern im Alter von 6 Wochen könnte einen Hinweis auf das spätere Auftreten von Osteochondrose geben und bei der Selektion von Zuchttieren zur Anwendung kommen (Koning et al., 2015). Aasmundstad et al. (2014) nutzt die Methode der CT zur Bestimmung von Osteochondrose-Scores zur Selektion von Zuchttieren. Daher wäre es auch denkbar, dass sich die Methode der MRT-Knorpelvolumenbestimmung ebenfalls für die Phänotypisierung von Zuchttieren eignen würde.

5.2.2.3 Einfluss Geschlecht

An allen Untersuchungstagen und bei allen Knorpelvolumina-Variablen zeigten die weiblichen Tiere niedrigere Werte als die männlich kastrierten Tiere. Diese Werte unterscheiden sich signifikant beim KV_FK_la (= Knorpelvolumen Femurkondylus links außen) zum Zeitpunkt des Scan 60 sowie beim KV_FK_ri (= Femurkondylus rechts innen) zum Zeitpunkt des Scan 30 und Scan 60 (siehe Tabelle 27). Da kastrierte Eber mehr Fett besitzen als Jungsauen (Soladoye et al., 2016) sowie schneller wachsen, schwerer sind und einen höheren Muskelscore aufweisen (Winn et al., 2015) ist eine logische Schlussfolgerung, dass die Knorpelvolumina bei kastrierten Ebern ebenfalls größer sind im Vergleich zu weiblichen Tieren. Kastrierte Eber sind insgesamt kräftiger und großrahmiger im Körperbau als Sauen.

5.2.3 Gemeinsame Betrachtung der untersuchten Knorpelregionen

In der vorliegenden Studie konnte bei allen Versuchsschweinen eine Abnahme von Knorpelgewebe des Femurkondylus am Kniegelenk im Verlauf des Wachstums beobachtet werden. Eine Abnahme von Knorpelgewebe mit steigendem Alter der Tiere ist physiologisch (Nakano et al., 1987) und darf auf

keinen Fall mit einem pathologischen Zustand gleichgesetzt werden. Eine vermehrte Abnahme von Knorpelgewebe der Femurkondylen am Kniegelenk könnte auch durch eine vermehrte Belastung bedingt sein, wobei diese Effekte noch durch die steigende Gewichtszunahme beschleunigt werden könnten. Die Tatsache, dass bei allen Schweinen in der Untersuchung des Knorpels am distalen Femurkondylus eine Abnahme der Knorpelvolumina festgestellt wurde, zeigt auch, dass die wiederholte Messung der Knorpelvolumina mit der verwendeten Methode möglich ist. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei der Untersuchung von Winkler (2017), da aus dieser Studie die Methode zur Bestimmung des Knorpelvolumens am Kniegelenk übernommen wurde.

Dagegen zeigen sich kontroverse Ergebnisse der Knorpelvolumina am Schulter- und Ellbogengelenk. Bei diesen Lokalisationen blieb das Knorpelvolumen gleich oder es kam zu einem leichten Anstieg des Knorpelvolumens mit zunehmendem Alter der Tiere (siehe Tabellen 22-24 im Kapitel 4.1.1). Eine mögliche Ursache hierfür könnte eine andere mechanische Belastung des Knorpels an der Vordergliedmaße im Vergleich zur Hintergliedmaße sein. Außerdem wären Unterschiede im Aufbau des Knorpelgewebes durch die unterschiedlichen Belastungsanforderungen denkbar. In der Literatur ist beschrieben, dass Knorpelveränderungen in Form von Osteochondrose am häufigsten an den Femurkondylen im Kniegelenk vorkommen (Jørgensen und Andersen, 2000) und der Knorpel an den Vordergliedmaßen weniger anfällig ist (Laenoi et al., 2011).

5.3 DXA-Daten

Aus zahlreichen Referenzen geht hervor, dass DXA im Bereich der Nutztierforschung mittlerweile etabliert ist (Böttinger 2006; Scholz und Baulain, 2009; Kremer et al. 2012; Pappenberger, 2014; Bernau et al. 2015; Scholz et al. 2015; Soladoye et al. 2016). Die Genauigkeit der DXA-Untersuchung beim Schwein wurde auch durch den Vergleich mit chemischen Analysen überprüft (Mitchell et al., 1998). Ein Nachteil in Bezug auf die Genauigkeit der DXA-Untersuchungsergebnisse ist, dass sich verschiedene DXA-Scanner in ihren Messwerten unterscheiden (Scholz et al., 2016). Daher sollten wie in der vorliegenden Studie alle zu untersuchenden Tiere mit demselben Gerät untersucht werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Insgesamt haben sich in dieser Studie die Vorteile der DXA-Methode bemerkbar gemacht, wie die geringe Strahlenbelastung für Tier und Mensch (Salvatoni et al. 1998; Shepherd et al., 2017), die kurze Untersuchungszeit und das vollautomatische Vorliegen der Daten über die Körperzusammensetzung ohne die Durchführung manueller Auswertungen bei einem Ganzkörperscan. Hinzu kommt die einfache Bedienung des DXA-Scanners, da nur eine kurze Einführung des Untersuchers notwendig ist.

5.3.1 Einfluss Haltungssystem

Die Schweine im AKS wiesen durchgängig signifikant höhere BMD-Werte auf als die Tiere im MZST. Nicht exakt erklärbar ergaben sich die Unterschiede bereits bei Scan 30. Dies könnte damit erklärt werden, dass die Nachkommen von einem der drei verwendeten Piétrain-Eber (Romul = Gruppe 2) durchschnittlich bereits bei 30 kg signifikant niedrigere BMD-Werte als die Nachkommen der zwei anderen eingesetzten Eber hatten ($0,514 \pm 0,009 \text{ g/cm}^2$ vs. $>0,568 \pm 0,009 \text{ g/cm}^2$) (siehe Abbildung 40 und Tabelle 31).

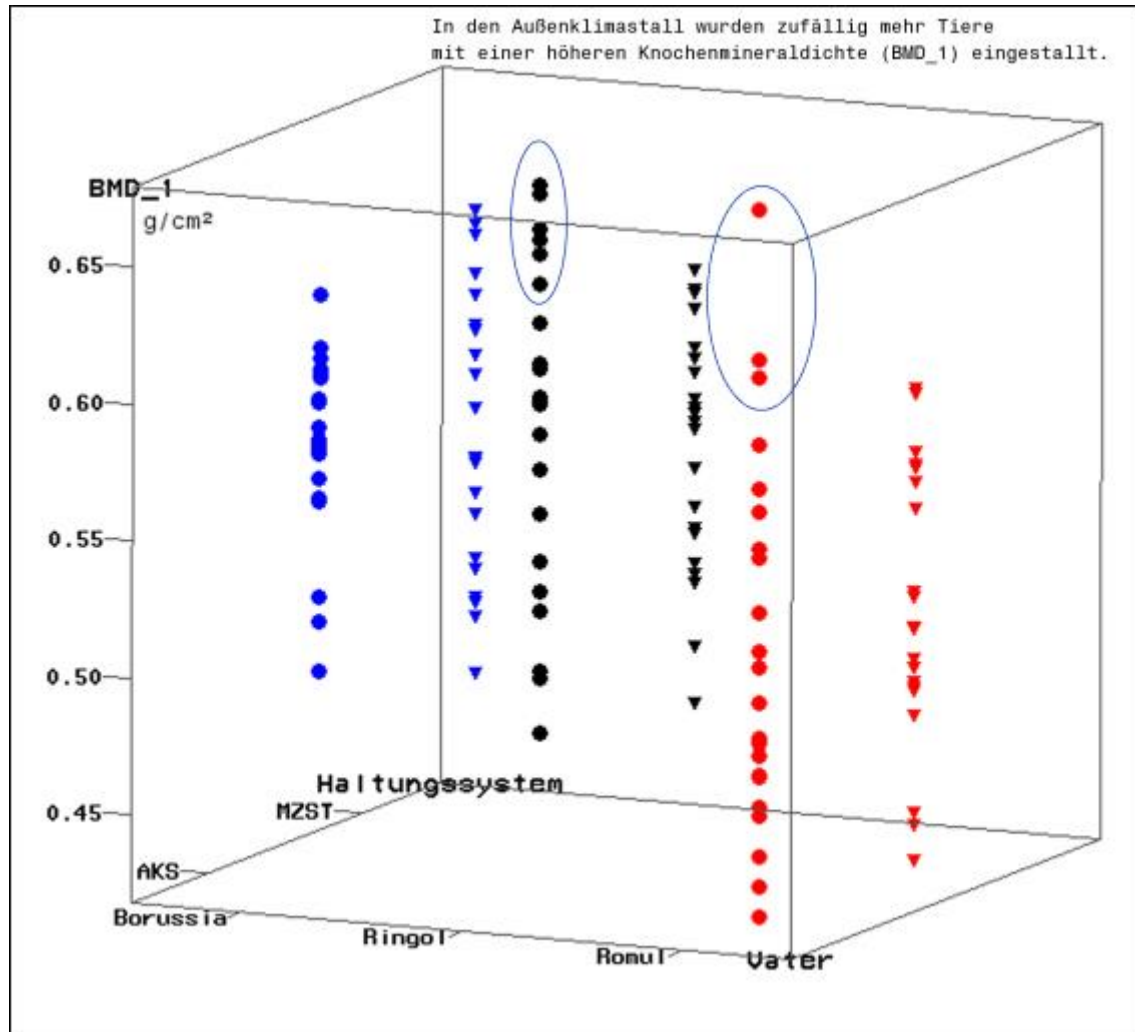


Abbildung 40: Darstellung der verschiedenen BMD-Werte der Nachkommen der verschiedenen Eber zum Zeitpunkt des Scan 30

Hingegen unterschieden sich die Tiere von AKS und MZST im Knochenmineralgehalt (BMC) erst signifikant ab Scan 60 mit höheren BMC-Werten bei den Tieren im AKS. Die signifikant höheren BMD- bzw. BMC-Werte bei Scan 60 und Scan 90 im AKS zeigen, dass das Skelett dieser Tiere stärker kalzifiziert war, da der durch DXA gemessene BMD sowie BMC positiv mit dem Gehalt von Kalzium und Phosphor korrelieren (Sutlovic et al., 2016). Die stärkere Kalzifizierung könnte durch die intensivere Bewegung (Böttinger, 2006) und Sonneneinstrahlung bedingt sein. Während der Durchführung des Lahmheitsscoring war aufgefallen, dass die Tiere im MZST sich nicht so ohne weiteres Auftreiben ließen und es war eine gewisse Bewegungsunlust zu

erkennen. Die Bewegungsunlust stand im Allgemeinen nicht mit Lahmheit in Verbindung. Bei den Variablen Fett_PC [%], Fett [g], Magerweichgewebe [g] und DXA-Gewicht [kg] gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen AKS und MZST. Somit scheint das Haltungssystem in dieser Studie keinen Einfluss auf diese Merkmale zu haben. Auch in der Studie von Böttinger (2006) wurden im Mastdurchgang (Herbst/ Winter) keine Unterschiede in der Körperzusammensetzung in den Haltungssystemen Außenklimastall (Stroh) und Mehrzweckstall (Vollspaltenboden) festgestellt. Dagegen wurde in der Untersuchung des zweiten Mastdurchgangs (Frühjahr/ Sommer) von Böttinger (2006) bei den Schweinen im AKS höhere Messwerte in den Weichgewebe- und Knochenmineralparametern (mit Ausnahme des prozentualen Magerweichgewebeanteils) nachgewiesen. Nach Böttinger (2006) ist das Klima ein einflussreicher Faktor um diese signifikanten Unterschiede zu erklären. Der jahreszeitliche Einfluss kann durch die vorliegende Studie nicht bestätigt werden, da die Tiere aus Gruppe 3 im Herbst und Winter untersucht wurden und in allen Knochenmineral- und Weichgewebeparametern (Knochenmineraldichte [g/cm²], Knochenmineralgehalt [g], Fettgewebeanteil [%], Weichgewebe [g], Fettgewebe [g] und Magerweichgewebe [g]) die größten Werte zeigten.

5.3.2 Einfluss Gruppe

Signifikante Unterschiede im BMD zwischen den Gruppen existierten an allen drei Untersuchungstagen (siehe Tabelle 32). Somit scheint die Ausprägung des Merkmals Knochenmineralisierung ebenfalls einem genetischen Einfluss zu unterliegen, da die Unterschiede schon zum Zeitpunkt des Scan 30 bestanden und zu diesem Zeitpunkt alle Schweine noch im selben Flatdecksystem eingestallt waren. Bei den Variablen Knochenmineralgehalt [g], Fett [g], Mager [g] und DXA-Gewicht [kg] zeigten sich signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt der Scans 60 und 90. Auffallend ist, dass Gruppe 2 jeweils die kleinsten Werte aufzeigt. Bei den Werten des BMD, BMC, Fett, Mager und DXA-Gewicht zum Zeitpunkt des Scan 60 zeigten die Tiere in Gruppe 1 die höchsten Werte, aber zum Zeitpunkt des Scan 90 wiesen durchgängig die Tiere der Gruppe 3 die höchsten Werte auf. Diese Ergebnisse scheinen zu zeigen,

dass genetische Faktoren einen Einfluss auf die Körperzusammensetzung von Mastschweinen haben, da die Tiere innerhalb einer Gruppe jeweils einen anderen Piétrain-Eber als Vater haben als die Tiere der zwei anderen Gruppen und das je nach Genetik Unterschiede im Wachstum auftreten. Die durchgängig niedrigsten Werte bei Gruppe 2 deuten ebenfalls auf eine genetische Komponente hin, da beim BMD bereits beim Eingangsscan (= Scan 30) signifikante Unterschiede bestanden, sowie bei den anderen DXA-Werten tendenzielle Unterschiede sichtbar waren. Ein wichtiges Hilfsmittel in der Tierzucht, um Merkmale von Schweinen zu verbessern, stellt die Selektion dar (van Steenbergen, 1989). Die gewünschten Merkmale eines Masthybriden wie hohe Tageszunahmen, gute Futterverwertung und ein hoher Muskelfleischanteil (Willam und Simianer, 2011) können somit durch eine gerichtete Selektion innerhalb der Vater- und Mutterlinien verbessert werden, wenn die züchterisch zu verändernden Merkmale eine genügend hohe Heritabilität besitzen. Die Heritabilität von BMD beim Schwein wird mit $h^2 = 0,92 \pm 0,16$ geschätzt (Kogelman et al. 2013). Aus unpublizierten Daten des Lehr- und Versuchsgutes Oberschleißheim (Abbildung 41) ergab sich aus der Eltern-Nachkommen-Regression nach Falconer (1995) für die DXA-Knochenmineraldichte des Ganzkörpers eine Heritabilität von $h^2=0,54 (\pm 0,13)$ (Scholz, persönliche Mitteilung, 2018).

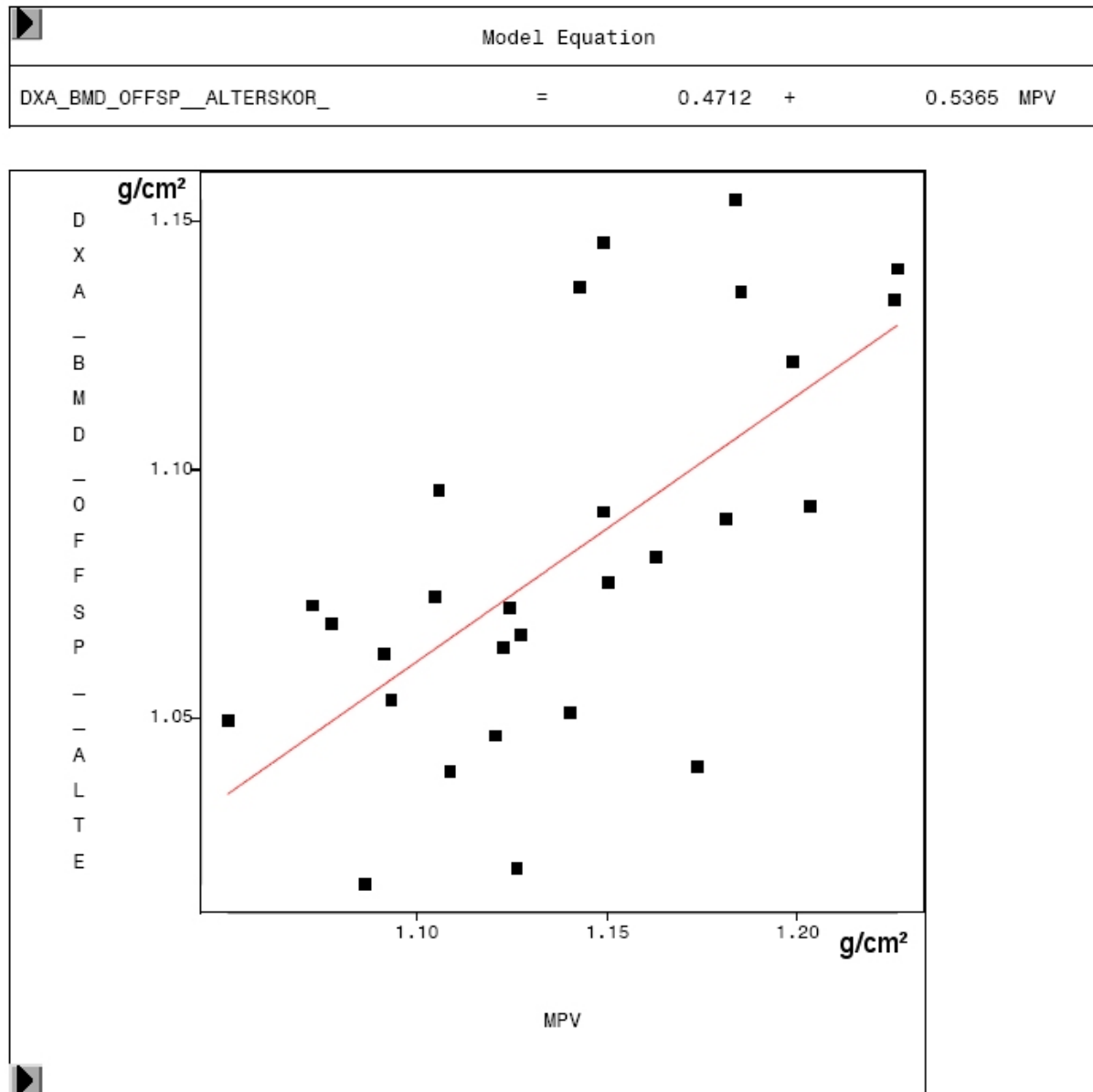


Abbildung 41: Beziehung zwischen den BMD-Werten (g/cm^2) von Nachkommen und Elterndurchschnitt (OFFSP = Nachkommen; MPV = Mid-Parent-Value (Elterndurchschnitt)); Der Anstieg gibt die Heritabilität der Knochenmineraldichte aus der Eltern-Nachkommen-Regression mit $h^2=0,54$ wieder (persönliche Mitteilung, Scholz, 2018)

5.3.3 Einfluss Geschlecht

Zwischen männlich kastrierten und weiblichen Tieren zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in BMD und BMC in dieser Studie (siehe Tabelle 33). Auch bei Pappenberger (2014) zeigten sich beim Merkmal BMD keine

signifikanten Unterschiede das Geschlecht betreffend, aber beim BMC wiesen Sauen einen signifikant höheren Wert als die männlich kastrierten Schweine auf. Bei den Variablen Fett_PC [%], Fett [g], Mager [g] und DXA-Gewicht [kg] zeigten sich signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90. Die männlich kastrierten Tiere wiesen die signifikant höheren Werte auf. In der Studie von Soladoye et al. (2016) zeigten die männlich kastrierten Tiere ebenfalls einen höheren Fettanteil in der DXA-Untersuchung. Bei Böttinger (2006) und Pappenberger (2014) ist beschrieben, dass männlich kastrierte Schweine weniger Muskelgewebe und mehr Fettgewebe als Sauen hatten. In der vorliegenden Studie wurde lediglich der Gehalt an Magerweichgewebe bestimmt, welcher sich aus Muskelgewebe, Organen und Bindegewebe zusammensetzt.

5.4 Beziehung zwischen Knorpelvolumen und Knochenmineraldichte/-gehalt

Es besteht ein Zusammenhang zwischen den Knorpelvolumina der Femurkondylen am Kniegelenk und den Knochenmineralparametern. In dieser Studie nahm - wie in der Studie von Winkler (2017) - das Knorpelvolumen an den Femurkondylen mit steigendem Knochenmineralgehalt (bzw. Knochenmineraldichte) ab (siehe Abbildung 39). Dagegen nahmen die Knorpelvolumina am Ellbogen- bzw. Schultergelenk tendenziell eher mit steigendem Knochenmineralgehalt (bzw. Knochenmineraldichte) zu. Diese Zusammenhänge wurden erst durch die Kombination der Daten aus DXA und MRT ersichtlich. Durch eine weitere Kombination der DXA- und MRT-Daten mit genomischen Informationen (wie SNPs, Mikrosateliten und Kandidatengenen) könnten noch tiefere Einsichten in biologische Abläufe wie zum Beispiel das Wachstum und die Veränderung der Körperzusammensetzung von Tier und Mensch erlangt werden (Scholz et al., 2016).

5.5 Klauenwinkel

5.5.1 Einfluss Haltungssystem

Das Haltungssystem hat erwartungsgemäß einen Einfluss auf den Klauenwinkel. Es traten signifikante Unterschiede bei den Variablen KW_VLi (= Klauenwinkel vorne links innen) und KW_VRi (= Klauenwinkel vorne rechts innen) zum Zeitpunkt des Scan 60 auf. Bei den übrigen Variablen (KW_VLa, KW_VRa, KW_HLi, KW_HLa, KW_HRi und KW_HRa) zeigten sich signifikante Unterschiede in Bezug auf das Haltungssystem bei Scan 60 und Scan 90 (siehe Tabelle 34). Die Tiere im MZST wiesen größere Klauenwinkel auf als die Tiere im AKS. Der größere Winkel der Tiere im MZST zeigt, dass die Klaue der Tiere auf Betonspaltenboden im Vergleich zu Strohhaltung stärker im vorderen Sohlenbereich abgenutzt wird. Daher scheint besonders für Zuchtschweine, die eine lange Nutzungsdauer aufweisen sollen, eine Haltung auf Stroh von Vorteil. Der Winkel zwischen Vorderwand und Sohle sollte bei Zuchtsauen zwischen 50° und 60° betragen (Ziron, 2014). Damit liegen die Winkel der untersuchten Schweine in dieser Studie im physiologischen Rahmen. Die teilweise kleiner als 50°- großen Winkel zum Zeitpunkt des Scan 30 sind sehr wahrscheinlich durch die noch im Wachstum befindlichen Klauen bedingt. Nach Mouttoto et al. (1999a) neigen die Klauen auf weichen Oberflächen dazu langsamer abgerieben zu werden. Die Folge ist eine Überwucherung des Horns und der Winkel zwischen der kranialen Oberfläche der Wand und der Sohle wird spitzer. Die Sohle neigt dazu eher konkav als flach zu sein. Die Gewichtsverteilung konzentriert den Druck auf das Wandhorn und das Auftreten von Wandläsionen wird wahrscheinlicher (Mouttoto et al., 1999a). Außerdem sind die Winkel an den Innenklauen stets kleiner als an den Außenklauen. Dies scheint zu zeigen, dass auf den Außenklauen mehr Gewicht lastet und diese mehr belastet sind. Nach Deen et al. (2010) findet während des Wachstums eines Schweines eine Übertragung des Gewichtes an den Vorder- und Hinterextremitäten auf die äußeren Klauen statt. Daher wird an der äußeren Klaue mehr Horn produziert und mit der Zeit berührt die Innenklaue nicht mehr den Boden. Folglich wird die ganze Last von der äußeren Klaue getragen (Deen et al., 2010).

5.5.2 Einfluss Gruppe

Die Gruppe (Jahreszeit/ väterliche Genetik) scheint keinen Effekt auf die Klauenwinkel zu haben (siehe Tabelle 35). Es existieren zwar signifikante Unterschiede bei den Variablen KW_VLi (Scan 90), KW_VLa (Scan 30 und Scan 90), KW_VRi (Scan 90), KW_VRa (Scan 30), KW_HLi (Scan 90), KW_HLa (Scan 60), KW_HRi (Scan 30) und KW_HRa (Scan 30 und Scan 60), aber die Verteilung der signifikanten Unterschiede sowie maximale und minimale Werte lassen keine eindeutige Erklärung zu.

5.5.3 Einfluss Geschlecht

Das Geschlecht scheint ebenfalls keinen Einfluss auf den Klauenwinkel zu haben. Ein signifikanter Unterschied bezüglich des Geschlechts bestand nur bei der Variablen KW_VRi zum Zeitpunkt des Scan 60 (siehe Tabelle 36). Bei allen anderen Variablen und Untersuchungszeitpunkten gab es keine signifikanten Unterschiede. Diese Ergebnisse sind ungewöhnlich, da in vielen phänotypischen Eigenschaften wie Fettgehalt und Knorpelvolumen die männlichen Tiere die größeren Werte aufzeigen und im allgemeinen Körperbau kräftiger gebaut sind. In der Literatur finden sich bei Ziron (2014) lediglich Angaben über die optimale Klauenwinkelung für Zuchtsauen. Daher wäre es sinnvoll in weiteren Studien die Winkelung der Klauen direkt bei Zuchtebern zu untersuchen und die Daten mit denen von Zuchtsauen zu vergleichen.

5.6 Scoring

In dieser Studie haben sich die einzelnen Scorings gut anwenden lassen. Der Untersucher konnte somit in kurzer Zeit eine Vielzahl von Daten erheben. Dennoch muss beachtet werden, dass ein Scoring eine subjektive Untersuchungsmethode darstellt (Bein und Unertl, 1993). Um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der erhobenen Daten zu verbessern, wurden alle Scorings bei jedem Tier von derselben Person durchgeführt. Insgesamt sind Scorings häufig kostengünstig und individuell an den Forschungsschwerpunkt anpassbar (Bein und Unertl, 1993; Nalon et al., 2013).

5.6.1 Lahmheitsscoring

Das Lahmheitsscoring wurde durchgeführt, um die Fähigkeit der untersuchten Tiere zum normalen Gehen zu evaluieren (Nalon et al., 2013). Zum Zeitpunkt des Scan 60 und Scan 90 zeigten mehr Tiere im MZST als im AKS Score-Werte von 1 und 2, was auf eine häufigere Lahmheit schließen lässt (siehe Tabelle 37). In der gesamten Studie wurde kein Score 3 (= hochgradige Lahmheit) vergeben. Dies ist als sehr positiv zu bewerten. Eine mögliche Ursache für das häufigere Auftreten (Zahlen) von Lahmheiten im MZST könnte eine durch den Betonspaltenboden erhöhte Verletzungsgefahr (zum Beispiel durch Hängenbleiben in den Spalten) sein. Außerdem ist der Boden im MZST sehr hart und somit lastet eine große Last auf den Klauen und Gelenken. Im AKS könnte es zu einer Dämpfung durch das Stroh kommen, wodurch der Bewegungsapparat der Schweine einer geringeren Belastung ausgesetzt ist. In einer Studie von Zoric et al. (2008) war die Gesamtprävalenz der Lahmheit am höchsten in einem Haltungssystem mit einem planbefestigten Betonboden mit einem Kotbereich aus Spaltenboden. Eine niedrigere Prävalenz wurde in einem Tiefstreusystem mit Torf festgestellt. Die Ergebnisse von Zoric et al. (2008) ähneln den Ergebnissen dieser Studie. Der Boden für Schweine sollte trittsicher, abriebfest und thermoneutral sein und den Tieren ausreichenden Liegekomfort bieten (Heinritzi et al., 2006). Diese Eigenschaften treffen mehr auf den Boden des AKS als auf den des MZST zu. Schweine auf planbefestigten, rutschigen Böden können leicht mit den Hintergliedmaßen ausrutschen (Waldmann et al., 2004). Dies könnte eine Erklärung dafür sein,

dass mehr Schweine im MZST Lahmheiten zeigten. Nalon et al. (2013) sieht in der Lahmheit ein multifaktoriell bedingtes Geschehen, welches durch Herdengesundheit, Ernährung, Traumen, Bodenbeschaffenheit, Gruppenmanagement, Konformation der Gliedmaßen und genetische Faktoren beeinflusst wird. Auch Thorup et al. (2007) sieht eine mögliche Ursache von Gliedmaßenproblemen in ungeeigneten und rutschigen Böden in Schweineställen. Die Ergebnisse von Thorup et al. (2007) zeigen, dass Schweine ihren Gang an rutschige Böden durch das Absenken der Laufgeschwindigkeit auf schmierigen und nassen Böden im Vergleich zu trockenen Böden anpassen. Außerdem verkürzen die Schweine ihre Progressionslänge und verlängern ihre Standphasendauer auf schmierigen Böden im Vergleich zu trockenem und nassem Boden. Schmieriger Boden war erwartungsgemäß für die Schweine am rutschigsten. Ein hoher Reibungskoeffizient ($>0,63$) wird benötigt um ein Rutschen der Schweine zu verhindern und somit ein sicheres Gehen auf trockenem Betonboden zu gewährleisten (Thorup et al., 2007). Schweine versuchen zwar ihren Gang den Mängeln in der Haltungsumwelt (Fußbodengestaltung) anzupassen, aber sind nicht immer dazu in der Lage. Im MZST ist der Boden im Kotbereich besonders schmierig, wodurch die Tiere leichter ausrutschen und stürzen können. Dies könnte ebenfalls eine Erklärung für das vermehrte Auftreten von Lahmheiten im MZST sein. Daher ist das Beobachten und Erfassen des Schweregrades von Lahmheiten in einer Herde ein wichtiges Tool zum Monitoring eines Lahmheitsproblems (Main et al., 2000). Die natürliche Locomotion eines Schweines entspricht einem Score 0 in dieser Studie. Bei der Verwendung von Scoringssystemen ist es wichtig die Grenzen dieser zu berücksichtigen. Nach Nalon et al. (2013) ist es nicht sinnvoll nur visuell zu scoren, sondern auch automatisierte Detektionssysteme zu verwenden. Dennoch können nach Nalon et al. (2013) einige visuelle Scoringssysteme effizient zum Herden-Screening eingesetzt werden, da sie wenig kosten und für die Anwendung an den jeweiligen Betrieb adaptiert werden können.

5.6.2 Bursascoring

Ab dem Zeitpunkt des Scan 60 zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen dem Aufkommen von Bursen bei den Tieren im AKS und MZST. Zum Zeitpunkt des Scan 60 wiesen 6,67 % der Tiere im AKS und 66,07% der Tiere im MZST Bursen auf. Zum Zeitpunkt des Scan 90 waren bei 1,69% der Tiere im AKS und bei 67,27 % der Tiere im MZST Bursen aufgetreten (siehe Tabelle 38). Das vermehrte Auftreten von Bursen bei den Schweinen im MZST könnte durch den harten Betonspaltenboden, welcher zu einer hohen mechanischen Belastung der Gliedmaßen führt, sowie dem vermehrten Liegen der Tiere im MZST bedingt sein. Die beobachtete Bewegungsunlust war nur in den seltensten Fällen mit einer Lahmheit verbunden. Diese Hypothese wird gestützt von Gareis et al. (2016), der die Ursache für Hilfsschleimbeutel (Bursen) in einer mechanischen Überbeanspruchung von exponierten Stellen am Tierkörper sieht. Laut Gareis et al. (2016) werden Bursen häufig durch die Haltung von Mastschweinen auf einstreulosen Spaltenboden verursacht und sind nicht embryonal angelegt. Auch die folgenden Angaben aus der Literatur stützen die Ergebnisse dieser Studie. Die Hypothese von Gillman et al. (2008) besagt, dass Bursen durch das Liegen der Schweine auf Boden ohne Einstreu bzw. Spaltenboden in Kombination mit dem Gewicht der Tiere entstehen. Verletzungen, die durch das Umherlaufen in der Bucht hervorgerufen werden, können als Ursache ebenfalls nicht ausgeschlossen werden (Gillman et al., 2008). Nach Mouttotou et al. (1998b) besteht das geringste Risiko für die Ausprägung von Bursen bei Schweinen, die auf planbefestigten Betonboden mit Tiefstreu (>10cm Stroh) gehalten werden. Bursale Läsionen wurden bei Schweinen von der 8. bis 28. Lebenswoche beobachtet, wobei die Prävalenz mit dem Alter anstieg. Das Risiko für Bursen kann gesenkt werden durch voll eingestreute Buchten oder einen eingestreuten Liegebereich. Ein größeres Risiko für das Auftreten von Bursen wurde signifikant assoziiert mit einem nassen Güllefilm im Kotbereich. Aus der Studie von (Mouttotou et al. 1999a) geht ebenfalls hervor, dass ein niedrigeres Risiko für Bursitis in einem Haltungssystem mit Stroh besteht. Dies entspricht den Ergebnissen der eigenen Studie, da die Tiere im Außenklimastall in einem Tiefstreusystem mit Stroh (> 10 cm) gehalten wurden und nur vereinzelt Bursen zeigten.

5.6.3 Klauenboniturscoring

5.6.3.1 Unterentwicklung der Innenklauen

Signifikante Unterschiede in Bezug auf das Haltungssystem zeigten sich lediglich bei Scan 60 an der linken und rechten Hintergliedmaße. An den Klauen der linken Hintergliedmaße hatten mehr Tiere im AKS einen Score 3 (63,33% und einen Score 4 (3,33%) im Vergleich zum MZST (Score 3 = 41,04%; Score 4 = 1,79%) (siehe Tabelle 39). Es ist auffällig, dass an allen Untersuchungstagen die Innenklauen an den Hintergliedmaßen mehr unterentwickelt waren als an den Vordergliedmaßen. Nach Deen et al. (2010) verlagert sich das Gewicht an den Vorder- und Hintergliedmaßen während des Wachstums auf die äußeren Klauen. Als Folge dessen wird mehr Horngewebe produziert und mit der Zeit berührt die Innere Klaue nicht oder kaum mehr den Boden und die gesamte Last wird auf der äußeren Klaue getragen (Deen et al., 2010).

5.6.3.2 Überlange Klauen

Signifikante Unterschiede zeigten sich zum Zeitpunkt des Scan 60 an der linken und rechten Hintergliedmaße und zum Zeitpunkt des Scan 90 an der linken Hintergliedmaße. Die Tiere im AKS (Stroh) zeigten häufiger Scorewerte von 2 als die im MZST, die zu 100% einen Score 1 aufwiesen (siehe Tabelle 39). Das bedeutet, dass die Klauen an den Hintergliedmaßen der Schweine im AKS geringgradig verlängert waren. Physiologisch wächst das Klauenhorn beim Schwein ca. 10 mm im Monat (Ziron, 2014). Überlange Klauen entstehen durch mangelnde Abnutzung des Horns, welche durch zu weichen Boden (Tiefstreu) oder mangelnde Bewegung der Schweine hervorgerufen wird (Heinritzi et al., 2006). Die Folgen können Stellungsanomalien, Lahmheiten, Hornrisse, Lederhautverletzungen und Infektionen sein (Heinritzi et al., 2006). Durch die verlängerten Klauen kommt es auch zu einer Änderung des Vorderwandwinkels der Klaue (Ziron, 2014). Außerdem besteht bei überlangen Klauen ein höheres Verletzungsrisiko für den Klauenschuh (Deen et al., 2010). Auch eine chronische Entzündung des Koriums führt zu einer erhöhten metabolischen Aktivität mit einem übermäßigen Hornwachstum (Deen et al., 2010). Diese Ursache scheint für die verlängerten Klauen im AKS jedoch nicht in Frage zu

kommen, da sonst keinerlei Entzündungssymptomatik beobachtet wurde. In der Studie von Calderón Díaz et al. (2015) hatten Sauen mit überlangen Klauen einen höheren Score für Erosionen ($p < 0,05$) und Korkenzieherklauen ($p < 0,05$) im Vergleich zu den Kontrolltieren. Die Sauen mit überlangen Klauen zeigten höhere Erosions-Scores an den Klauen der Hintergliedmaße ($p < 0,05$) im Vergleich zu den Kontrolltieren. Sauen mit überlangen Klauen verbrachten weniger Zeit mit Fressen ($p < 0,05$), rutschten auf dem Boden ($p < 0,05$), verlagerten ihr Gewicht ($p < 0,05$) häufig zwischen ihren Hinterbeinen, benötigten mehr Aufstehversuche zum Fressen ($p < 0,05$) und zeigten eine kürzere Latenzzeit zum Hinlegen nach dem Fressen ($p < 0,01$) im Vergleich zu den Kontrollsauen. Überlange Klauen an den Hintergliedmaßen wurden assoziiert mit steigenden Scores für andere Klauenveränderungen und häufigeres Rutschen im Abferkelsystem (Calderón Díaz et al., 2015). Daraus kann geschlossen werden, dass überlange Klauen die Schweine in ihrer Bewegung und der Ausübung ihres natürlichen Verhaltens einschränken. Wenn ein Spaltenboden mit weiten Spalten nass ist, können die Klauen in die Spalten rutschen und eingeklemmt werden (Mouttotou et al. 1999a). Bei verlängerten Zehen setzt sich der Schmutz im Hohlraum auf den kranialen Teil der volaren Oberfläche und dies prädisponiert für Zehenerosionen (Mouttotou et al. 1999a). Verlängerte Klauen sind folglich mit einer erhöhten Verletzungsgefahr für die Tiere verbunden. Somit besteht beim Merkmal überlange Klauen ein Vorteil für die Tiere im MZST.

5.6.3.3 Überlange Afterklauen

In dieser Studie wurden keine überlangen Afterklauen beobachtet. Alle Tiere, egal ob im AKS oder im MZST, wiesen einen Score von 1 auf. Die Afterzehen besitzen eine Trage- und Stützfunktion (König und Liebich, 2009), daher wäre bei einer Verlängerung, die Bewegung der Schweine ebenfalls eingeschränkt.

5.6.3.4 Kronsaumverletzungen

Es zeigten sich in dieser Studie keine signifikanten Unterschiede des Merkmals Kronsaumverletzungen in den zwei Haltungssystemen. Durch Verletzungen am Kronsaum kann ein Panaritium entstehen (Heinritzi et al., 2006). Die Haut am Kronsaum ist geschwollen, gerötet, vermehrt warm und druckempfindlich

(Heinritzi et al., 2006). Als Ursachen gelten Verletzungen durch übermäßigen Hornabrieb oder mangelhafte Haltungssysteme (unebene harte Böden, defekte Spaltenböden) (Heinritzi et al., 2006). Behandelte Tiere benötigen eine weiche Aufstallung auf Stroh und die Ursachen (z.B. defekte Spaltenböden) in der Haltungsumwelt müssen entfernt werden (Heinritzi et al., 2006). Kronsaumverletzungen kamen in dieser Studie zwar insgesamt sehr selten und nur bei vereinzelt Tieren vor, aber der größte Teil der betroffenen Tiere war im MZST eingestallt.

5.6.3.5 Lederhautblutungen/Wandhornabschürfungen

Es zeigten sich lediglich signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt des Scan 90 an der rechten Vordergliedmaße und an der rechten Hintergliedmaße mit einem Vorteil für die Tiere im MZST (siehe Tabelle 39). Oft ist nur eine einzelne Klaue oder Fuß von Lederhautblutungen und Wandhornabschürfungen betroffen (Deen et al., 2010). Die vermehrte beobachtete Aktivität der Schweine im AKS könnte den vergleichsweise häufiger vorkommenden Wandhornabschürfungen und Lederhautblutungen zu Grunde liegen. Aber um die vermehrt beobachtete Aktivität der Schweine im AKS zu beweisen, hätte das Bewegungsverhalten der Tiere mittels Pedometer bestimmt werden müssen. Außerdem ist im Haltungssystem AKS eine Rampe vorhanden, auf der die Schweine vom Liegebereich zum erhöhten Fressbereich aufsteigen können. Dies könnte eine potenzielle Verletzungsgefahr für die Klauen darstellen, aber da hätten die Tiere im AKS auch vermehrt Sohlendefekte und Hornrisse zeigen müssen, was nicht der Fall ist.

5.6.3.6 Hornrisse

Für das Merkmal Hornrisse zeigten sich zwischen den Haltungssystemen und Scores zum Zeitpunkt der Startuntersuchung (Scan 30) keine Assoziationen. Signifikante Assoziationen zwischen den Scores und dem Haltungssystem für Hornrisse resultierten bei Scan 60 an beiden Klauen der Hintergliedmaße sowie bei Scan 90 an den Klauen aller vier Gliedmaßen (siehe Tabelle 39). Die Schweine im MZST wiesen häufiger Score-Werte von 2 bis 4 auf als die Tiere im AKS. Das vermehrte Auftreten von Hornrissen bei den Tieren im MZST könnte durch mechanische Schädigungen (z.B. Hängenbleiben in den Spalten)

bedingt sein. Das Horn hat eine wichtige Schutzfunktion gegen Verletzungen, Austrocknung, Flüssigkeitsansammlungen, Temperaturschäden und Eindringen von Keimen (König und Liebich, 2009). Hornrisse stellen Zusammenhangstrennungen im Verlauf der Hornröhrchen dar, die häufig kaudolateral an der äußeren Klaue entstehen (Heinritzi et al., 2006). Besonders zu trockenes Horn und das Wandhorn ist prädisponiert für die Entstehung von Hornrissen, weil es hohen Belastungen ausgesetzt ist (Heinritzi et al., 2006). Eine bedarfsdeckende Versorgung mit Biotin ist wichtig, da ein Mangel ebenso zu Hornrissen in der Wand und Sohle der Klaue führen kann (Jackson und Cockcroft, 2007). Außerdem werden Hornrisse und andere Klauenläsionen durch eine Verbesserung der Zinkversorgung reduziert (Deen et al., 2010). Daher wäre es für nachfolgende Studien interessant, den genauen Einfluss von Ergänzungsfuttermitteln auf die Klauengesundheit zu evaluieren. Kontroverse Ergebnisse zu dieser Studie publizierten Mouttotou et al. (1999a). Dort zeigten Schweine in Haltungssystemen mit eingestreuten Böden eine höhere Prävalenz von Rissen im Vergleich zu Schweinen auf planbefestigtem, uneingestreutem Boden aus Beton. Tiere auf Teilspaltenboden zeigten ebenfalls eine steigende Prävalenz für Risse als Tiere auf planbefestigtem Betonboden. Risse waren signifikant häufiger prävalent bei Schweinen auf Betonboden mit viel Stroh (26,0%) oder wenig Stroh (26,7%) im Vergleich zu Schweinen auf planbefestigtem Betonboden ohne Einstreu (18,81%) (Mouttotou et al. 1999a).

5.6.3.7 Sohlendefekte

Sohlendefekte zeigten zwischen den Haltungssystemen und den Scorewerten zum Zeitpunkt der Startuntersuchung keine Assoziationen. Es traten signifikante Unterschiede an den Klauen beider Vordergliedmaßen bei Scan 90 auf- mit häufigeren Scores von 2 bis 4 bei den Tieren im MZST (siehe Tabelle 39). Somit hatten die Schweine im MZST zum Zeitpunkt des Scan 90 mehr Sohlendefekte an den Vordergliedmaßen, welche durch eine vermehrte mechanische Belastung (z.B. durch rauen Fußboden) bedingt sein könnte. Die Vordergliedmaßen tragen mehr Last, sind höheren vertikalen Kräften ausgesetzt und haben länger anhaltende Standphasen als die Hintergliedmaßen (Thorup et al., 2007). Bei den auf Stroh gehaltenen

Schweinen könnte die vermehrte Last an den Vordergliedmaßen durch das Stroh abgefedert werden. Zoric et al. (2008) beobachtete schwerste Sohlenabschürfungen im Haltungssystem mit einem „neuen“ planbefestigten Betonboden mit einem Spaltenboden im Kotbereich. Das geringste Ausmaß wurde in Tiefstreusystemen mit Torf beobachtet. Sohlenläsionen kamen an allen Untersuchungstagen im Haltungssystem mit Betonboden signifikant häufiger vor als im Tiefstreusystem mit Torf (Zoric et al., 2008). Mouttotou et al. (1999a) beobachteten ebenfalls, dass Schweine in eingestreuten Haltungssystemen eine geringere Prävalenz von Sohlenerosionen im Vergleich zu Schweinen auf planbefestigtem, uneingestreutem Betonboden aufwiesen. Ein Vollspaltenboden wurde assoziiert mit einer steigenden Prävalenz von Sohlenerosionen (81,5%). Auf Stroh gehaltene Schweine hatten eine signifikant niedrigere Prävalenz von Sohlenerosionen (34% und 56%) als Schweine auf planbefestigtem Betonboden ohne Stroh (67,4% und 16%). Fußläsionen sind bedingt durch ungleichmäßige Druckverteilung an der gewichtstragenden Oberfläche der Klauen bei der Haltung auf Spaltenboden. Bei zu breiten Spalten oder kaputten Rändern der Spalten entsteht eine Druckerhöhung auf den Teil der Klaue, der mit dem Boden in Kontakt ist. Der Staudruck auf die gewichtstragende Oberfläche des Fußes wird verringert, wenn die Tiere auf einen elastischen Boden (z.B. Stroh) laufen. Dies könnte erklären warum Läsionen auf der volaren Oberfläche der Füße (Sohlenerosionen, Fersenerosionen, Fersen-Flaps) bei den auf Stroh gehaltenen Schweinen weniger häufig auftraten (Mouttotou et al., 1999a).

5.6.3.8 Zusammenhangstrennungen Sohle/ Ballen, Weiße-Linie-Defekte

Lediglich beim Scan 60 wurden an der linken Vordergliedmaße von Tieren des MZST signifikant häufiger Score-Werte von 2 bis 4 als bei Tieren des AKS festgestellt (siehe Tabelle 39). Es könnte sich hierbei um einen Zufallseffekt handeln, da die signifikanten Unterschiede nur an einem Scantag und nur am linken Vorderbein aufgetreten sind. Im Unterschied zu den eigenen Ergebnissen hatten Schweine in Haltungssystemen mit eingestreuten Böden eine höhere Prävalenz von Weiße-Linie-Defekten im Vergleich zu Schweinen

Diskussion

auf planbefestigtem, uneingestreutem Betonboden. Tiere auf Teilspaltenboden zeigten eine steigende Prävalenz von Weiße-Linie-Defekten (signifikant höhere Prävalenz von 59,8%) im Vergleich zu planbefestigtem Boden (Moultotou et al. 1999a).

6 Schlussfolgerung

Es war möglich in dieser Studie Unterschiede in Bezug auf die Gliedmaßengesundheit in den zwei Haltungssystemen AKS (= Außenklimastall mit Tiefstreu) und MZST (= Mehrzweckstall mit Vollspaltenboden, sog. Ökospalten aus Beton) aufzuzeigen. Tiere im AKS zeigten höhere Werte im Knochenmineralgehalt ab dem Zeitpunkt des Scan 60. Die Tiere im MZST hatten signifikant größere Klauenwinkel, aber sowohl im MZST als auch im AKS lagen die Winkel im physiologischen Bereich. Die Schweine im MZST zeigten außerdem häufiger Lahmheiten, Bursitis, Hornrisse und Sohlendefekte an den Vordergliedmaßen. Daher scheint der Betonspaltenboden einen negativen und das Tiefstreusystem einen positiven Einfluss auf diese Merkmale zu haben. Es muss jedoch bedacht werden, dass ein Haltungssystem mit Tiefstreu einen größeren Arbeits- und finanziellen Aufwand für den Landwirt bedeutet und daher nicht so ohne weiteres umsetzbar ist. Überraschend war, dass das Haltungssystem in dieser Studie keinen Einfluss auf die Knorpelvolumina im Ellbogen-, Schulter und Kniegelenk hatte. Abschließend ist zuzusagen, dass neben dem Haltungssystem auch weitere Faktoren wie Genetik, Fütterung und Gruppengefüge einen Einfluss auf die Klauen- und Gelenksgesundheit haben, da es sich um ein multifaktorielles Problem handelt. Da das Symptom der Lahmheit mit erheblichen Kosten und durch die entstehenden Schmerzen für die Tiere mit einem Tierschutzproblem einhergeht, welches seit mehreren Jahrzehnten in der Schweineproduktion besteht, ist ein dringender Handlungsbedarf vorhanden. Obwohl die Lahmheitsproblematik bei Mast- und Zuchtschweinen schon seit Jahrzehnten eine große Bedeutung in der „Schweineforschung“ hat, ist weiterer Forschungsbedarf gegeben um ein Haltungssystem zu entwickeln, welches im Einklang mit den Bedürfnissen von Schweinen, Landwirten und Verbrauchern steht.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es den Einfluss des Haltungssystems auf die Klauen- und Gelenksgesundheit beim Mastschwein zu untersuchen. Als Untersuchungsmethoden kamen die Magnetresonanztomographie (MRT), Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA), Messung der Klauenwinkel und verschiedene Scoringssysteme zum Einsatz (Bursa-Scoring, Lahmheits-Scoring, Klauenbonitur-Scoring). Als Versuchstiere dienten 127 Masthybriden (Piétrain x Deutsche Landrasse). Die Versuchstiere wurden in zwei Haltungssystemen und in 3 verschiedenen Mastdurchgängen gehalten. Die Aufzucht erfolgte in einem konventionellen Flatdecksystem mit Vollspaltenboden aus Kunststoff. Nach der ersten Untersuchung mit 30 kg Lebendmasse wurde zufällig – unter Berücksichtigung des Geschlechterverhältnisses von weiblichen Tieren und männlichen Kastraten- jeweils die Hälfte der Tiere eines Durchganges in ein Haltungssystem mit Vollspaltenboden aus Beton (Mehrzweckstall = MZST) oder in einen Außenklimastall mit Tiefstreu aus Stroh (Außenklimastall = AKS) eingestallt. Die Tiere blieben bis zum Ende der Mast in dem jeweiligen Haltungssystem. Jedes Schwein wurde dreimal im Verlauf der Mast untersucht: mit 25-30 kg (Scan 30), mit 60-70 kg (Scan 60) und mit 90-100 kg (Scan 90) Körpergewicht.

Für die Untersuchungen wurde den Tieren eine intramuskulär zu verabreichende Injektionsnarkose injiziert, bestehend aus Azaperon (2 mg/kg, Stresnil®, Elanco) und Ketamin (20 mg/kg, Ursotamin®, Serumwerk Bernburg). Nach dem Wirkeintritt der Narkose wurde zuerst eine Untersuchung mittels MRT (Siemens Magnetom open mit 0,2 T), dann ein Ganzkörper DXA-Scan (GE Lunar iDXA) und die Messung der Klauenwinkel sowie das Klauenbonitur-Scoring (aid) sowie die Untersuchung auf Bursen durchgeführt. Mittels eines Klauenboniturschemas wurden an der gesamten Klaue folgende Merkmale erfasst: Unterentwicklung der Innenklauen, überlange Klauen, Hornbruch und überlange Afterklauen bzw. Afterklauenverletzungen. Der Kronsaum wurde auf Verletzungen und Panaritien untersucht. Am Wandhorn wurden Defekte wie Wandhornabschürfungen, Lederhautblutungen, Hornrisse, Hornspalten und Hornklüfte erfasst. Der Sohlen- und Ballenbereich wurde auf Sohlendefekte,

Ballenhorndefekte, Ballenhornwucherungen, Weiße-Linie-Defekte und Zusammenhangstrennungen untersucht. Es wurde dokumentiert ob es keine (Score 1), geringgradige (Score 2), mittelgradige (Score 3) oder hochgradige Befunde (Score 4) gab. Mittels Palpation wurde das Auftreten von Bursen beurteilt. Am darauffolgenden Tag wurde das Gangbild mit Scores von 0-3 bewertet. Score 0 steht für einen normalen Gang und Score 3 zeigt eine hochgradige Lahmheit an.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mittels SAS 9.3. (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA). Für die Daten der Knorpelvolumina (MRT), Körperzusammensetzung (DXA) und Klauenwinkel kam eine Mischmodellanalyse mittels REML zum Einsatz. Als Signifikanzgrenze wurde $p \leq 0,05$ festgelegt. Eine Häufigkeitsanalyse unter Verwendung eines Chi²- bzw. Fisher-Exakt-Testes diente der Analyse der Klauenboniturdaten, der Bursadaten und der Daten aus dem Lahmheitsscoring.

Das Haltungssystem scheint keinen nennenswerten Einfluss auf das Knorpelvolumen im Schulter-, Ellbogen- und Kniegelenk zu haben. Im Kniegelenk traten keinerlei signifikante Unterschiede des Knorpelvolumens in Bezug auf das Haltungssystem auf. Im Schulter- bzw. Ellbogengelenk gab es vereinzelt nicht erklärbare signifikante Unterschiede bezüglich des Knorpelvolumens zum Zeitpunkt des Scan 30. Die Ergebnisse der DXA-Untersuchung zeigen, dass Schweine im AKS ab Scan 60 signifikant höhere BMC-Werte aufweisen als Schweine aus dem MZST. Die Tiere im MZST wiesen, hingegen, die signifikant größeren Klauenwinkel im Vergleich zu den Tieren im AKS auf. Außerdem waren die Tiere im MZST bei Scan 60 signifikant und bei Scan 90 tendenziell häufiger lahm als die Tiere im AKS. Bursitis trat häufiger bei den Schweinen im MZST auf. Im Rahmen des Klauenbonitur-Scorings ergaben sich signifikant häufiger Hornrisse bei Scan 60 (Hintergliedmaßen) bzw. Scan 90 (Vorder- und Hintergliedmaße) bei den Tieren im MZST. Die Schweine im MZST hatten zudem signifikant häufiger Sohlendefekte an den Vordergliedmaßen als die Tiere im AKS. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Haltungssystem einen Einfluss auf die Gliedmaßengesundheit bei Schweinen hat. Zusätzlich scheinen genetische und

Zusammenfassung

nutritive Faktoren sowie das Gruppengefüge die Gesundheit der Gliedmaßen zu beeinflussen, was für ein multifaktorielles Problem spricht.

8 Summary

The aim of this study was to investigate the effect of the housing system on the claw- and joint health in fattening pigs. The methods of examination were Magnetic Resonance Imaging (MRI), Dual Energy X-ray Absorptiometry (DXA), measurement of the claw angle and different scoring-systems (bursitis-scoring, lameness-scoring and claw-lesion-scoring). The experimental animals were 127 hybrid pigs (Piétrain x German Landrace). The subjects were investigated in two different housing systems and in three different fattening batches. The animals were raised in a conventional flatdeck housing system with a fully slatted plastic floor. After the first examination at 30 kg body weight, half of the animals of one batch were put – considering the sex ratio of female animals and male castrates – in a barn system with fullyslatted concrete floor (Mehrzweckstall = MZST), or in an outdoor climate barn with straw litter (Außenklimastall = AKS). All animals stayed in their housing system until the end of the fattening period. Each pig was examined three times during the fattening period: at a weight of 25-30 kg (Scan 30), at 60-70 kg (Scan 60), and at 90-100 kg (Scan 90). The animals received an intramuscularly injection anesthesia of azaperone (2 mg/kg, Stresnil®, Elanco) and ketamine (20 mg/kg, Ursotamin®, Serumwerk Bernburg) before each examination. After onset of anesthesia, the examination started with a MRI scan (Siemens Magnetom open with 0.2 T) followed by a whole body DXA scan (GE Lunar iDXA), and the measurement of the claw angles as well as the claw-lesion-scoring (aid) and finally the investigation of bursitis. The following criteria of the whole claw were recorded using a claw lesion schema: underdevelopment of the inner claw, overlong claws, horn cracks and overlong dewclaws respectively dewclaw breaks. The coronary band was investigated for injury and panaritiums. Defects like abrasions, hemorrhage of the corium, and cracks were investigated on the wall. The area of the sole and heel was examined on sole defects, heel defects, heel proliferations, white line defects and separations of the passage of sole and heel. It was documented if there are none (Score 1), low (Score 2), middle (Score 3) or severe (Score 4) findings. The incidence of bursitis was evaluated by palpation. The locomotion was evaluated the next day by scores from 0 to 3.

Summary

Score 0 stands for a normal locomotion and score 3 shows a severe lameness. The statistical analysis of the data happened by SAS 9.3. (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA). A mixed model analysis by REML served as tool for the variance analysis of the traits related to cartilage volume (MRI), body composition (DXA) and claw angles. A frequency analysis under use of Chi² respectively Fishers-Exact-Test conduces to the analysis of the data of claw lesions, bursitis and lameness scoring. The housing system seems to have no significant effect on the cartilage volume in shoulder-, elbow and knee joint. There were no significant differences of the cartilage volume in relation to the housing system in the knee joint and there are occasionally unexplained significant differences in cartilage volume in the shoulder- respectively elbow joint at the time of Scan 30. The results of the DXA study show that it is possible to identify differences of the bone mineralization in the two housing systems. The animals in AKS and MZST differed significantly at the time of Scan 60 with higher BMC values recorded for pigs in AKS. The housing system seems also to have an effect on the claw angle. Animals of MZST showed significant larger claw angles compared with the animals in AKS. In addition, the animals in MZST were significantly more often lame than the animals in AKS at Scan 60 and Scan 90. Bursitis occurred more frequently in the pigs in the MZST. Claw-lesion-scoring revealed significantly more often claw cracks at Scan 60 (hind limb) and Scan 90 (front and hind limb) in the MZST. The pigs in the MZST also had significantly more often common sole defects on the forelimbs than the animals in AKS. These results indicate that the housing system has an impact on limb health in pigs, but also genetic and nutritional factors, as well as the group structure, appear to effect limb health - directing towards a multifactorial problem.

9 Literaturverzeichnis

Aasmundstad, T.; Gjerlaug-Enger, E.; Grindflek, E.; Vangen, O. (2014): Genetic trends of conformation traits and genetic correlations to osteochondrosis in boars. In: *Animal : an international journal of animal bioscience* 8 (7), S. 1045–1052. DOI: 10.1017/S1751731114001074.

Aasmundstad, T.; Kongsro, J.; Wetten, M.; Dolvik, N. I.; Vangen, O. (2013): Osteochondrosis in pigs diagnosed with computed tomography: heritabilities and genetic correlations to weight gain in specific age intervals. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 7 (10), S. 1576–1582. DOI: 10.1017/S1751731113001158.

Ala-Kurikka, Eve; Heinonen, Mari; Mustonen, Katja; Peltoniemi, Olli; Raekallio, Marja; Vainio, Outi; Valros, Anna (2017): Behavior changes associated with lameness in sows. In: *Applied Animal Behaviour Science* 193, S. 15–20. DOI: 10.1016/j.applanim.2017.03.017.

Anil, S.; Anil, Leena; Deen, John; Baidoo, Samuel K.; Walker, Roger D. (2007): Factors associated with claw lesions in gestating sows. In: *Journal of Swine Health and Production* 15 (2), S. 78–83.

Azuma, Takashi; Nakai, Ryusuke; Takizawa, Osamu; Tsutsumi, Sadami (2009): In vivo structural analysis of articular cartilage using diffusion tensor magnetic resonance imaging. In: *Magnetic Resonance Imaging* 27 (9), S. 1242–1248. DOI: 10.1016/j.mri.2009.05.012.

Baumhoer, Daniel; Steinbrück, Ingo; Götz, Werner (2003): Histologie. Kurzlehrbuch zum Gegenstandskatalog; [neuer GK]. 2. Aufl. München: Urban & Fischer (GK 1).

Bazzocchi, Alberto; Ponti, Federico; Albisinni, Ugo; Battista, Giuseppe; Guglielmi, Giuseppe (2016): DXA: Technical aspects and application. In: *European Journal of Radiology* 85 (8), S. 1481–1492. DOI: 10.1016/j.ejrad.2016.04.004.

Bein, T.; Unertl, K. (1993): Möglichkeiten und Grenzen von Score-Systemen in der Intensivmedizin. In: *Anästhesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie* 28, S. 476–483.

Bernau, M.; Kremer, P. V.; Lauterbach, E.; Tholen, E.; Petersen, B.; Pappenberger, E.; Scholz, A. M. (2015): Evaluation of carcass composition of intact boars using linear measurements from performance testing, dissection, dual energy X-ray absorptiometry (DXA) and magnetic resonance imaging (MRI). In: *Meat Science* 104, S. 58–66. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.01.011.

Bernau, Maren (2011): Untersuchungen zu einer möglichen Vorverlegung der Schlachtleistungsprüfung beim Schwein mit Hilfe der Magnetresonanztomographie (MRT) und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) in vivo. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Lehr- und Versuchsgut Oberschleißheim.

Böttinger, Martina (2006): Untersuchung des Einflusses verschiedener Produktionssysteme auf das Wachstum beim Schwein unter Verwendung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Messung von Fett, Magerweichgewebe und Knochenmineralansatz. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Institut für Tierzucht.

Bradley, C. L.; Frank, J. W.; Maxwell, C. V.; Johnson, Z. B.; Powell, J. G.; van Amstel, S. R.; Ward, T. L. (2007): Characterization of Claw Lesions Associated with Lameness in the University of Arkansas Sow Herd. In: *Arkansas Animal Science Department Report*, S. 106–110.

Broom, Donald M. (1996): Animal welfare defined in terms of attempts to cope with the environment. In: *Acta Agriculturae Scandinavica, Sektion A -Animal Science* 27, S. 22–28.

Busch, Marie Erika; Wachmann, Henrik (2011): Osteochondrosis of the elbow joint in finishing pigs from three herds: associations among different types of joint changes and between osteochondrosis and growth rate. In: *Veterinary Journal (London, England : 1997)* 188 (2), S. 197–203. DOI: 10.1016/j.tvjl.2010.03.021.

Calderón Díaz, Julia Adriana; Stienezen, Ivonne M.J.; Leonard, Finola C.; Boyle, Laura Ann (2015): The effect of overgrown claws on behaviour and claw abnormalities of sows in farrowing crates. In: *Applied Animal Behaviour Science* 166, S. 44–51. DOI: 10.1016/j.applanim.2015.03.001.

Carey, John J.; Delaney, Miriam F. (2017): Utility of DXA for monitoring, technical aspects of DXA BMD measurement and precision testing. In: *Bone* 104, S. 44–53. DOI: 10.1016/j.bone.2017.05.021.

Chapinal, N.; Ruiz de la Torre, J.L.; Cerisuelo, A.; Gasa, J.; Baucells, M. D.; Coma, J. et al. (2010): Evaluation of welfare and productivity in pregnant sows kept in stalls or in 2 different group housing systems. In: *Journal of Veterinary Behavior: Clinical Applications and Research* 5 (2), S. 82–93. DOI: 10.1016/j.jveb.2009.09.046.

Christensen, O. F.; Busch, M. E.; Gregersen, V. R.; Lund, M. S.; Nielsen, B.; Vingborg, R. K. K.; Bendixen, C. (2010): Quantitative trait loci analysis of osteochondrosis traits in the elbow joint of pigs. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 4 (3), S. 417–424. DOI: 10.1017/S1751731109991248.

Dahme, Erwin; Weiss, Eugen (1999): Grundriß der speziellen pathologischen Anatomie der Haustiere. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Enke.

Deen, J.; Schuttert, M.; van Amstel, S.; Ossent, P.; van Barneveld, R. (2009): FeetFirst: Lesion Scoring Guide. Zinpro Corporation. Eden Prairie, MN, USA.

Deen, John; Stalder, Ken; Schuttert, Marrina; van Barneveld, Robert; van Amstel, Sarel; Ward, Terry et al. (2010): An introduction to Sow Lameness, Claw Lesions and Pathogenesis Theories. Feet First. Zinpro Corporation.

Draper, D. D.; Rothschild, M. F.; Christian, L. L. (1992): Effects of divergent selection for leg weakness on muscle and bone characteristics in Duroc swine. In: *Genet Sel Evol* 24 (4), S. 363. DOI: 10.1186/1297-9686-24-4-363.

Dryden, Gordon McL. (2008): Animal Nutrition Science. Wallingford: CABI.

Ekman, Stina; Carlson, Cathy S. (1998): The Pathophysiology of Osteochondrosis. In: *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 28 (1), S. 17–32. DOI: 10.1016/S0195-5616(98)50002-2.

Etterlin, Pernille Engelsen; Ytrehus, Bjornar; Lundeheim, Nils; Heldmer, Eva; Osterberg, Julia; Ekman, Stina (2014): Effects of free-range and confined housing on joint health in a herd of fattening pigs. In: *BMC Veterinary Research* 10, S. 208. DOI: 10.1186/s12917-014-0208-5.

Falconer, D. S. (1995): Einführung in die quantitative Genetik. Stuttgart: UTB-Verlag für Wissenschaft.

Frantz, Nolan Z.; Andrews, Gordan A.; Tokach, Michael D.; Nelssen, Jim L.; Goodband, Robert D.; DeRouchey, Joel M.; Dritz, Steve S. (2008): Effect of dietary nutrients on osteochondrosis lesions and cartilage properties in pigs. In: *Journal of the American Veterinary Medical Association* 232 (10), S. 1535. DOI: 10.2460/javma.232.10.1535.

Friendship, R. M.; Wilson, M. R.; Almond, G. W.; McMillan, I.; Hacker, R. R.; Pieper, R.; Swaminathan, S. S. (1986): Sow Wastage: Reasons for and Effect on Productivity. In: *Canadian Journal of Veterinary Research* 50, S. 205–208.

Fukawa, K.; Kusuhara, S. (2001): The Genetic and Non-Genetic Aspects of Leg Weakness and Osteochondrosis in Pigs. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences* 14 (1), S. 114–122.

Gareis, Manfred; Oberländer, Sabine; Zipplies, Johanna; Reese, Sven; Schade, Benjamin; Böhm, Brigitte; Schwaiger, Karin (2016): Prävalenz von Hilfsschleimbeuteln (Bursae auxiliares) und Klauenverletzungen bei Mastschweinen zum Schlachtzeitpunkt - Ergebnisse einer Studie an vier Schlachthöfen. In: *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift* 129 (9/10), S. 428–436.

Giannicola, Giuseppe; Spinello, Paolo; Scacchi, Marco; Gumina, Stefano (2017): Cartilage thickness of distal humerus and its relationships with bone dimensions: magnetic resonance imaging bilateral study in healthy elbows. In: *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 26 (5), e128-e136. DOI: 10.1016/j.jse.2016.10.012.

Gillman, C. E.; KilBride, A. L.; Ossent, P.; Green, L. E. (2008): A cross-sectional study of the prevalence and associated risk factors for bursitis in weaner, grower and finisher pigs from 93 commercial farms in England. In: *Preventive Veterinary Medicine* 83 (3-4), S. 308–322. DOI: 10.1016/j.prevetmed.2007.09.001.

Glüer, Claus-C. (2017): 30years of DXA technology innovations. In: *Bone* 104, S. 7–12. DOI: 10.1016/j.bone.2017.05.020.

Granz, Ernst (1985): Tierproduktion. 159 Tab. 10., überarb. u. erw. Aufl. Berlin: Parey.

Grégoire, J.; Bergeron, R.; D'Allaire, S.; Meunier-Salaün, M-C; Devillers, N. (2013): Assessment of lameness in sows using gait, footprints, postural behaviour and foot lesion analysis. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 7 (7), S. 1163–1173. DOI: 10.1017/S1751731113000098.

Hamada, H.; Nishii, T.; Tamura, S.; Tanaka, H.; Wakayama, T.; Sugano, N. (2015): Comparison of load responsiveness of cartilage T1rho and T2 in porcine knee joints: an experimental loading MRI study. In: *Osteoarthritis and Cartilage / OARS, Osteoarthritis Research Society* 23 (10), S. 1776–1779. DOI: 10.1016/j.joca.2015.05.019.

Heinonen, Mari; Peltoniemi, Olli; Valros, Anna (2013): Impact of lameness and claw lesions in sows on welfare, health and production. In: *Livestock Science* 156 (1-3), S. 2–9. DOI: 10.1016/j.livsci.2013.06.002.

Heinritzi, Karl; Gindele, Hans R.; Reiner, Gerald; Schnurrbusch, Ute (2006): Schweinekrankheiten. Stuttgart: Ulmer (UTB Veterinärmedizin Erkrankungen der Haustiere, 8325). Online verfügbar unter http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2755843&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Hempfling, Harald; Krenn, Veit (2016): Schadenbeurteilung am Bewegungssystem. Band 1: Grundlagen, Gelenkflächen, Osteonekrosen, Epiphysen, Impingement, Synovialis. Berlin, Boston: De Gruyter (Schadenbeurteilung am Bewegungssystem, Band 1). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1515/9783110284409>.

Heymsfield, S. B.; Wang, Z.; Baumgartner, R. N.; Ross, R. (1997): Human body composition: advances in models and methods. In: *Annual Review of Nutrition* 17, S. 527–558. DOI: 10.1146/annurev.nutr.17.1.527.

Hubbell, J. H. (1969): Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV. US National Bureau of Standards. Washington, DC.

Jackson, Peter G. G.; Cockcroft, Peter D. (2007): Handbook of Pig Medicine. Edinburgh, New York: Saunders/Elsevier (Pig medicine). Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780702028281>.

Jackson, Simon A.; Harrison, Sarah N.; Ihle, Ursula (2009): CT, MRT, Ultraschall auf einen Blick. 1. dt. Aufl. München: Elsevier Urban & Fischer.

Jørgensen, B.; Andersen, S. (2000): Genetic parameters for osteochondrosis in Danish Landrace and Yorkshire boars and correlations with leg weakness and production traits. In: *Anim. Sci.* 71 (03), S. 427–434. DOI: 10.1017/S1357729800055442.

Karlen, Guillermo A.M.; Hemsworth, Paul H.; Gonyou, Harold W.; Fabrega, Emma; David Strom, A.; Smits, Robert J. (2007): The welfare of gestating sows in conventional stalls and large groups on deep litter. In: *Applied Animal Behaviour Science* 105 (1-3), S. 87–101. DOI: 10.1016/j.applanim.2006.05.014.

Keenan, K. E.; Besier, T. F.; Pauly, J. M.; Han, E.; Rosenberg, J.; Smith, R. L. et al. (2011): Prediction of glycosaminoglycan content in human cartilage by age, T1ρ and T2 MRI. In: *Osteoarthritis and Cartilage* 19 (2), S. 171–179. DOI: 10.1016/j.joca.2010.11.009.

Keinprecht, Helga; Pichler, Martina; Pothmann, Harald; Huber, Johann; Iwersen, Michael; Drillich, Marc (2016): Short term repeatability of body fat thickness measurement and body condition scoring in sheep as assessed by a relatively small number of assessors. In: *Small Ruminant Research* 139, S. 30–38. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2016.05.001.

Klopfleisch, Robert (2013): Multiparametric and semiquantitative scoring systems for the evaluation of mouse model histopathology-a systematic review. In: *BMC Veterinary Research* 9, S. 123. DOI: 10.1186/1746-6148-9-123.

Kogelman, Lisette J. A.; Kadarmideen, Haja N.; Mark, Thomas; Karlskov-Mortensen, Peter; Bruun, Camilla S.; Cirera, Susanna et al. (2013): An f2 pig resource population as a model for genetic studies of obesity and obesity-related diseases in humans: design and genetic parameters. In: *Frontiers in Genetics* 4, S. 29. DOI: 10.3389/fgene.2013.00029.

König, Horst Erich; Liebich, Hans-Georg (Hg.) (2009): Anatomie der Haussäugetiere. Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis. 4., überarb. Aufl. Stuttgart: Schattauer.

Koning, D. B. de; Damen, E.P.C.W.; Nieuwland, M.G.B.; van Grevenhof, E. M.; Hazeleger, W.; Kemp, B.; Parmentier, H. K. (2015): Association of natural (auto-) antibodies in young gilts with osteochondrosis at slaughter. In: *Livestock Science* 176, S. 152–160. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.03.017.

Koning, D. B. de; van Grevenhof, E. M.; Laurensen, B. F. A.; Ducro, B. J.; Heuven, H. C. M.; Groot, P. N. de et al. (2012): Associations between osteochondrosis and conformation and locomotive characteristics in pigs. In: *Journal of Animal Science* 90 (13), S. 4752–4763. DOI: 10.2527/jas.2012-5310.

Kremer, P. V.; Fernández-Fígares, I.; Förster, M.; Scholz, A. M. (2012): In vivo body composition in autochthonous and conventional pig breeding groups by dual-energy X-ray absorptiometry and magnetic resonance imaging under special consideration of Cerdo Ibérico. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 6 (12), S. 2041–2047. DOI: 10.1017/S1751731112001267.

Laenoi, Watchara; Uddin, Muhammad Jasim; Cinar, Mehmet Ulas; Grosse-Brinkhaus, Christine; Tesfaye, Dawit; Jonas, Elisabeth et al. (2011): Quantitative trait loci analysis for leg weakness-related traits in a Duroc × Pietrain crossbred population. In: *Genetics, Selection, Evolution: GSE* 43, S. 13. DOI: 10.1186/1297-9686-43-13.

- Larbi, A.; Viala, P.; Cyteval, C.; Snene, F.; Greffier, J.; Faruch, M.; Beregi, J-P (2016): Imaging of tumors and tumor-like lesions of the knee. In: *Diagnostic and Interventional Imaging* 97 (7-8), S. 767–777. DOI: 10.1016/j.diii.2016.06.004.
- Laskey, M. Ann; Phil, D. (1995): Dual-Energy X-Ray Absorptiometry and Body Composition. In: *Nutrition* 12 (1), S. 45–51.
- Le, Hong Thu; Nilsson, Katja; Norberg, Elise; Lundeheim, Nils (2015): Genetic association between leg conformation in young pigs and sow reproduction. In: *Livestock Science* 178, S. 9–17. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.05.025.
- Lewis, Austin J.; Southern, Lincoln Lee (Hg.) (2001): Swine Nutrition. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0646/00049395-d.html>.
- Lisgara, M.; Skampardonis, V.; Kouroupides, S.; Leontides, L. (2015): Hoof lesions and lameness in sows in three Greek swine herds. In: *Journal of Swine Health and Production* 23 (5), S. 244–251.
- Littmann, E.; Götz, K.-U.; Dodenhoff, J. (2006): Schweinezucht und Schweineproduktion. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 7. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ISSN 1611-4159.).
- López-Serrano, M.; Reinsch, N.; Looft, H.; Kalm, E. (2000): Genetic correlations of growth, backfat thickness and exterior with stayability in large white and landrace sows. In: *Livestock Production Science* 64 (2-3), S. 121–131. DOI: 10.1016/S0301-6226(99)00169-4.
- Lösel, D.; Kremer, P.; Albrecht, E.; Scholz, A. M. (2010): Comparison of a GE Lunar DPX-IQ and a Norland XR-26 dual energy X-ray absorptiometry scanner for body composition measurements in pigs – <i>in vivo&/i>. In: *Arch. Anim. Breed.* 53 (2), S. 162–175. DOI: 10.5194/aab-53-162-2010.
- Maataoui, Adel; Gurung, Jessen; Ackermann, Hanns; Abolmaali, Nasreddin; Kafchitsas, Konstantinos; Vogl, Thomas J.; Khan, M. Fawad (2010): Facilitating cartilage volume measurement using MRI. In: *European Journal of Radiology* 75 (2), S. 241–244. DOI: 10.1016/j.ejrad.2009.05.005.

MacGavin, M. Donald; Zachary, James F. (2011): Pathologie der Haustiere. 1. Aufl. München: Urban Fischer Verlag. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=807890>.

Maes, D.G.D.; Janssens, G.P.J.; Delputte, P.; Lammertyn, A.; Kruif, A. de (2004): Back fat measurements in sows from three commercial pig herds. Relationship with reproductive efficiency and correlation with visual body condition scores. In: *Livestock Production Science* 91 (1-2), S. 57–67. DOI: 10.1016/j.livprodsci.2004.06.015.

Main, D. C. J.; Clegg, J.; Spatz, A.; Green, L. E. (2000): Repeatability of a lameness scoring system for finishing pigs. In: *Veterinary Record* 147, S. 574–576.

Mitchell, A. D.; Scholz, A. M.; Conway, J. M. (1998): Body composition analysis of pigs from 5 to 97 kg by dual-energy X-ray absorptiometry. In: *Applied Radiation and Isotopes* 49 (5-6), S. 521–523. DOI: 10.1016/S0969-8043(97)00066-3.

Mitchell, A. D., Solomon, M. B.; Rumsey, T. S. (1997): Composition Analysis of Beef Rib Sections by Dual-energy X-ray Absorptiometry. In: *Meat Science* 47 (1/2), S. 115–124.

Mouttotou, N.; Green, L. E.; Hatchell, F. M. (1998a): Adventitious bursitis of the hock in finishing pigs. Prevalence, distribution and association with floor type and foot lesions. In: *The Veterinary Record* 142 (5), S. 109–114. DOI: 10.1136/vr.142.5.109.

Mouttotou, N.; Hatchell, F. M.; Green, L. E. (1999a): Foot lesions in finishing pigs and their associations with the type of floor. In: *The Veterinary Record* 144, S. 629–632.

Mouttotou, N.; Hatchell, F. M.; Green, L. E. (1999b): Prevalence and risk factors associated with adventitious bursitis in live growing and finishing pigs in south-west England. In: *Preventive Veterinary Medicine* 39, S. 39–52.

Moultotou, N.; Sterry, J.; Green, L. E. (1998b): Cohort study of the association between adventitious bursitis of the hock and the age at slaughter and carcass quality of the pigs on one farm. In: *Veterinary Record* 142, S. 52–55.

Müller, Simone (2005): Leistungsfähigkeit der Rasse Pietrain in Deutschland. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

Mustonen, Katja; Ala-Kurikka, Eve; Orro, Toomas; Peltoniemi, Olli; Raekallio, Marja; Vainio, Outi; Heinonen, Mari (2011): Oral ketoprofen is effective in the treatment of non-infectious lameness in sows. In: *Veterinary Journal (London, England: 1997)* 190 (1), S. 55–59. DOI: 10.1016/j.tvjl.2010.09.017.

Nakano, T.; Brennan, J. J.; Aherne, F. X. (1987): Leg Weakness and Osteochondrosis in Swine: A Review. In: *Canadian Journal of Animal Science* 67, S. 883–901.

Nalon, E.; Conte, S.; Maes, D.; Tuytens, F.A.M.; Devillers, N. (2013): Assessment of lameness and claw lesions in sows. In: *Livestock Science* 156 (1-3), S. 10–23. DOI: 10.1016/j.livsci.2013.06.003.

Nalon, E.; Maes, D.; van Dongen, S.; van Riet, M M J; Janssens, G. P. J.; Millet, S.; Tuytens, F. A. M. (2014): Comparison of the inter- and intra-observer repeatability of three gait-scoring scales for sows. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 8 (4), S. 650–659. DOI: 10.1017/S1751731113002462.

Nickel, Richard; Schummer, August; Seiferle, Eugen; Frewein, Josef; Augsburg, Heinz (Hg.) (2004): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Bewegungsapparat. 8., unveränd. Aufl. Stuttgart: Parey (Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, 1).

Nord, Russel H. (1998): DXA Body Composition Properties: Inherent in the Physics or Specific to Scanner Type? In: *Applied Radiation and Isotopes* 49 (5/6), S. 517–518.

Nordbø, Ø.; Gangsei, L. E.; Aasmundstad, T.; Grindflek, E.; Kongsro, J. (2018): The genetic correlation between scapula shape and shoulder lesions in sows. In: *Journal of Animal Science* 96 (4), S. 1237–1245. DOI: 10.1093/jas/sky051.

Olsson, Anne-Charlotte; Svendsen, Jørgen; Botermans, Jos; Bergsten, Christer (2016): An experimental model for studying claw lesions in growing female pigs. In: *Livestock Science* 184, S. 58–63. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.12.005.

Pappenberger, Elke Maria (2014): Vergleich der Körperzusammensetzung konventioneller und alternativer Masthybriden mittels Dualenergieröntgenabsorptiometrie und Magnetresonanztomographie. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Lehr- und Versuchsgut Oberschleißheim.

Pietrobelli, Angelo; Formica, Carmelo; Wang, Zimian; Heymsfield, Steven B. (1996): Dual-energy X-ray absorptiometry body composition model: review of physical concepts. In: *American Journal of Physiology* 271.

Pluym, L.; van Nuffel, A.; Dewulf, J.; Cools, A.; Vangroenweghe, F.; van Hoorebeke, S.; Maes, D. (2011): Prevalence and risk factors of claw lesions and lameness in pregnant sows in two types of group housing. In: *Veterinarni Medicina* 56 (3), S. 101–109.

Pluym, L. M.; van Nuffel, A.; van Weyenberg, S.; Maes, D. (2013): Prevalence of lameness and claw lesions during different stages in the reproductive cycle of sows and the impact on reproduction results. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 7 (7), S. 1174–1181. DOI: 10.1017/S1751731113000232.

Rae, L. S.; Vankan, D. M.; Rand, J. S.; Flickinger, E. A.; Ward, L. C. (2016): Measuring body composition in dogs using multifrequency bioelectrical impedance analysis and dual energy X-ray absorptiometry. In: *Veterinary Journal (London, England: 1997)* 212, S. 65–70. DOI: 10.1016/j.tvjl.2016.04.007.

Salas, C.; Ekmay, R. D.; England, J.; Cerrate, S.; Coon, C. N. (2012): Determination of Chicken Body Composition Measured by Dual Energy X-Ray Absorptiometry. In: *International J. of Poultry Science* 11 (7), S. 462–468. DOI: 10.3923/ijps.2012.462.468.

Salvatoni, Alessandro; Brambilla, Paolo; Deiana, Manuela; Nespoli, Luigi (1998): Application of DEXA in body composition assessment in children. In: *Ann Diagn Paed Pathol* 2 (1), S. 49–51. DOI: 10.1007/s100570050008.

Sambras, Hans Hinrich (2016): Farbatlas Nutztierassen. 263 Rassen in Wort und Bild. 8. Auflage. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer. Online verfügbar unter <http://www.ulmer.de/artikel.dll/Webshop?RC=Book2Look&ISBN=978-3-8001-1296-8>.

Schild, Hans H. (1997): MRI made easy. 2. Aufl. S.I.: Schering (Schering Diagnostika).

Schmitz, Randy J.; Wang, Hsin-Min; Polprasert, Daniel R.; Kraft, Robert A.; Pietrosimone, Brian G. (2017): Evaluation of knee cartilage thickness: A comparison between ultrasound and magnetic resonance imaging methods. In: *The Knee* 24 (2), S. 217–223. DOI: 10.1016/j.knee.2016.10.004.

Scholz, A. M. (2002): In-vivo Methoden zur Analyse von Muskelstoffwechsel und Körperzusammensetzung beim Schwein unter besonderer Berücksichtigung genetischer Einflüsse. Habilitationsschrift. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Institut für Tierzucht.

Scholz, A.M., Heller, P., Waldmann, K.-H., Wolf, P., Kamphues, J., Förster, M. (2004): Eignung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Erfassung der Knochenmineralisierung von Ebern. In: *Züchtungskunde* 76 (2), S. 94-107

Scholz, A. M.; Baulain, U. (2009): Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Nutztier. In: *Züchtungskunde* 81 (2), S. 86–96.

Scholz, A. M.; Bunger, L.; Kongsro, J.; Baulain, U.; Mitchell, A. D. (2015): Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 9 (7), S. 1250–1264. DOI: 10.1017/S1751731115000336.

Scholz, Armin M.; Kusec, Goran; Bernau, Maren (2016): Physikalische Grundlagen der nicht-invasiven Techniken wie Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie und Magnetresonanztomographie zur In-vivo-Phänotypisierung. In: *Nova Acta Leopoldina NF* 121 (409), S. 21–31.

Duden, die deutsche Rechtschreibung (2009). Unter Mitarbeit von Werner Scholze-Stubenrecht. 24., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Sonderausg. Augsburg: Weltbild (Der Duden, Bd. 1).

Schreiweis, M. A.; Orban, J. I.; Ledur, M. C.; Moody, D. E.; Hester, P. Y. (2005): Validation of dual-energy X-ray absorptiometry in live White Leghorns. In: *Poultry Science* 84 (1), S. 91–99. DOI: 10.1093/ps/84.1.91.

Shepherd, John A.; Bennett K. NG.; Sommer, Markus J.; Heymsfield, Steven B. (2017): Body composition by DXA. In: *Bone* 104, S. 101–105. DOI: 10.1016/j.bone.2017.06.010.

Sinowatz, Fred; Hees, Herbert (2006): Histologie. Kurzlehrbuch der Zytologie und mikroskopischen Anatomie. 4. Auflage.

Soladoye, O. P.; López Campos, Ó.; Aalhus, J. L.; Gariépy, C.; Shand, P.; Juárez, M. (2016): Accuracy of dual energy X-ray absorptiometry (DXA) in assessing carcass composition from different pig populations. In: *Meat Science* 121, S. 310–316. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.06.031.

Sutlovic, Davorka; Boric, Igor; Sliskovic, Livia; Popovic, Marijana; Knezovic, Zlatka; Nikolic, Ivana et al. (2016): Bone mineral density of skeletal remains: Discordant results between chemical analysis and DXA method. In: *Legal Medicine (Tokyo, Japan)* 20, S. 18–22. DOI: 10.1016/j.legalmed.2016.03.008.

Swennen, Q.; Janssens, G. P. J.; Geers, R.; Decuypere, E.; Buyse, J. (2004): Validation of dual-energy x-ray absorptiometry for determining in vivo body composition of chickens. In: *Poultry Science* 83 (8), S. 1348–1357. DOI: 10.1093/ps/83.8.1348.

Tarrés, J.; Bidanel, J. P.; Hofer, A.; Ducrocq, V. (2006): Analysis of longevity and exterior traits on Large White sows in Switzerland. In: *Journal of Animal Science* 84 (11), S. 2914–2924. DOI: 10.2527/jas.2005-707.

Thorup, V. M.; Tøgersen, F. Aa; Jørgensen, B.; Jensen, B. R. (2007): Biomechanical gait analysis of pigs walking on solid concrete floor. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* (1), S. 708–715. DOI: 10.1017/S1751731107736753.

Tinkle, A. K.; Duberstein, K. J.; Wilson, M. E.; Parsley, M. A.; Beckman, M. K.; Torrison, J. et al. (2017): Functional claw trimming improves the gait and locomotion of sows. In: *Livestock Science* 195, S. 53–57. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.10.013.

Toth, F.; Nissi, M. J.; Wang, L.; Ellermann, J. M.; Carlson, C. S. (2015): Surgical induction, histological evaluation, and MRI identification of cartilage necrosis in the distal femur in goats to model early lesions of osteochondrosis. In: *Osteoarthritis and Cartilage / OARS, Osteoarthritis Research Society* 23 (2), S. 300–307. DOI: 10.1016/j.joca.2014.11.009.

Tóth, Ferenc; Nissi, Mikko J.; Zhang, Jinjin; Benson, Michael; Schmitter, Sebastian; Ellermann, Jutta M.; Carlson, Cathy S. (2013): Histological confirmation and biological significance of cartilage canals demonstrated using high field MRI in swine at predilection sites of osteochondrosis. In: *Journal of Orthopaedic Research: official publication of the Orthopaedic Research Society* 31 (12), S. 2006–2012. DOI: 10.1002/jor.22449.

Van Grevenhof, E. M.; Ott, S.; Hazeleger, W.; van Weeren, P. R.; Bijma, P.; Kemp, B. (2011): The effects of housing system and feeding level on the joint-specific prevalence of osteochondrosis in fattening pigs. In: *Livestock Science* 135 (1), S. 53–61. DOI: 10.1016/j.livsci.2010.06.010.

Van Steenberghe, E. J. (1989): Description and Evaluation of a Linear Scoring System for Exterior Traits in Pigs. In: *Livestock Production Science* 23, S. 163–181.

Waldmann, Karl-Heinz; Plonait, Hans; Bickhardt, Klaus (Hg.) (2004): Lehrbuch der Schweinekrankheiten. 4. Aufl. Stuttgart: Parey.

Wang, J.; Antony, B.; Zhu, Z.; Han, W.; Pan, F.; Wang, X. et al. (2015): Association of patellar bone marrow lesions with knee pain, patellar cartilage defect and patellar cartilage volume loss in older adults: a cohort study. In: *Osteoarthritis and Cartilage* 23 (8), S. 1330–1336. DOI: 10.1016/j.joca.2015.02.018.

Webster, A. J. (2001): Farm animal welfare: the five freedoms and the free market. In: *Veterinary Journal (London, England: 1997)* 161 (3), S. 229–237. DOI: 10.1053/tvj.2000.0563.

Wei, Bo; Mao, Fengyong; Guo, Yang; Yao, Qingqiang; Tang, Cheng; Xu, Yan et al. (2015): Using 7.0T MRI T2 mapping to detect early changes of the cartilage matrix caused by immobilization in a rabbit model of immobilization-induced osteoarthritis. In: *Magnetic Resonance Imaging* 33 (8), S. 1000–1006. DOI: 10.1016/j.mri.2015.06.007.

Weiß, Jürgen; Pabst, Wilhelm; Bellof, Gerhard (Hg.) (2011): Tierproduktion. 243 Tabellen. 14., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Enke.

Welfare Quality® (2009): Welfare Quality Assessment Protocol for Pigs (Sows and Piglets, Growing and Finishing Pigs). Welfare Quality Consortium. Lelystad, Netherlands.

Whalin, Laura; Pairis-Garcia, Monique; Proudfoot, Kathryn; Stalder, Kenneth; Johnson, Anna (2016): Validating behavioral sampling techniques for lame sows administered flunixin meglumine and meloxicam. In: *Livestock Science* 191, S. 103–107. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.07.017.

Wiesemüller, Winfried; Bolduan, Gerhard (Hg.) (1993): Ernährung monogastrischer Nutztiere. Mit 166 Tabellen. Jena, Stuttgart: G. Fischer.

Willam, Alfons; Simianer, Henner (2011): Tierzucht. 1. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB Agrarwissenschaften, 3526).

Willgert, Katriina (2011): The economic and welfare impact of lameness in sows in England. Royal Veterinary College.

Winkler, Katharina (2017): Erfassung der Knorpelvolumina am Kniegelenk von Zucht- und Mastschweinen unterschiedlicher Genotypen mittels Magnetresonanztomographie und Knochenmineraldichtemessung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Lehr- und Versuchsgut Oberschleißheim.

Winn, K. J.; Mafi, G.; Bloomberg, B.; VanOverbeke, D.; Ramanathan, R.; Staude, J. (2015): Production, carcass, and meat quality characteristics of

commercial crossbred gilts and barrows fed two different diets. In: *Meat Science* 101, S. 142. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.09.099.

Zinpro Corporation (2009): FeetFirst Lokomotion Scoring Version 1.0.

Ziron, Martin (2014): Klauengesundheit bei Zuchtsauen. Strategien für langlebige Tiere. Frankfurt am Main: DLG-Verl. (AgrarPraxis kompakt).

Zoric, Mate; Nilsson, Ebba; Mattsson, Sigbrit; Lundeheim, Nils; Wallgren, Per (2008): Abrasions and lameness in piglets born in different farrowing systems with different types of floor. In: *Acta Veterinaria Scandinavica* 50, S. 37. DOI: 10.1186/1751-0147-50-37.

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich danke sagen an die Personen, ohne deren Hilfe die Durchführung und Anfertigung dieser Promotion nicht möglich gewesen wäre:

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Armin Scholz, der mir die Möglichkeit gegeben hat diese Arbeit unter seiner Leitung anzufertigen. Vielen Dank für die Betreuung dieser Dissertation und die Hilfe bei allen wissenschaftlichen Fragen.

Mein besonderer Dank geht an Frau Prof. Dr. Maren Bernau für die Idee dieses Projektes und für die Unterstützung in jeder Promotionsphase sowie Lebenslage. Danke, dass du immer an mich geglaubt und zu mir gestanden hast.

Ich danke Herrn Gert Kaiser und den Mitarbeitern des Schweinebereiches, Dominik Stieler und Lorenz Zimmermann, für die Pflege der verwendeten Versuchstiere.

Außerdem danke ich Frau Ann-Sophie Kraus und den Mitarbeitern des Außendienstes für die Hilfe an den teils sehr langen Scantagen.

Desweiteren danke ich Herrn Richard Bätz für die Hilfe bei technischen Problemen und den leckeren Kaffee.

Ich danke meinen Eltern Barbara und Joachim Dölle, dass sie mir das Studium der Veterinärmedizin ermöglicht und mir somit einen Kindheitstraum erfüllt haben. Ich danke Euch für die Unterstützung in jeder Phase meines Lebens. Es ist ein schönes Gefühl liebe Menschen zu haben, die immer für einen da sind und bei denen für einen die Tür immer offen steht.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Geschwistern Margrit und Matthias für die Unterstützung. Besonders meine Schwester Margrit hat mir viel Kraft gegeben immer weiter zu machen.

Bei Alexandra Gebhardt und Werner Große möchte ich mich herzlich für die Hilfe bei der Formatierung dieser Dissertation bedanken.